

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra enegetiky

Středotlaký parní kotel na spalování odpadních produktů z
výroby bioetanolu

Medium-Pressure Boiler for the Combustion of Waste
Products of the Production of Bioethanol

Student:

Bc. Lukáš Zelinka

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Zelinka**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: **Středotlaký parní kotel na spalování odpadních produktů z výroby bioetanolu.**
Medium-Pressure Boiler for the Combustion of Waste Products of the Production of Bioethanol.

Zásady pro vypracování:

Středotlaký parní kotel, generující sytou vodní páru, na spalování odpadních produktů z výroby bioetanolu o výkonu 18 t/h.

1. Použití odpadních produktů z výroby bioetanolu, jako paliva. Vlastnosti pro spalování.
2. Návrh uspořádání kotle, jeho žárotrubné konvekční části.
3. Stanovení potřeby spalovacího vzduchu, objemových toků spalin, I-t diagram vzduchu a spalin pro zadané palivo.
4. Sdílení tepla v konvekčním tahu kotle. Zhodnocení podílu sálání. Stanovení teplosměnné plochy.
5. Technicko-ekonomické vyhodnocení navržených teplosměnných ploch.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Černý, Janeba, Teyssler: Parní kotle, TP 32, SNTL Praha 1983
- [2] Černý a kolektiv: Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975
- [3] Budaj: Parní kotle. Podklady pro tepelný výpočet. Skriptum VUT Brno 1986
- [4] ON 070417 ze 1.8.1984, ÚNM Praha
- [5] Skripta VŠB, katedra energetiky
- [6] Firemní podklady: firmy ČKD DIZ Praha; firmy DOTEK Kolín; společnosti Bioethanol Kolín; společnosti TH, s.r.o. Ratíškovice


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

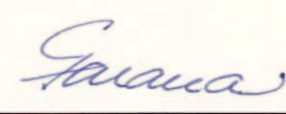
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2011

podpis.....

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB - TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB - TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2011

podpis.....

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Zelinka

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Starý Poddvorov 177

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ZELINKA, L. *Středotlaký parní kotel na spalování odpadních produktů z výroby bioetanolu*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 66 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout středotlaký parní kotel na spalování odpadních produktů z výroby bioetanolu. Jako palivo bylo použito směsi dvou paliv. Byly určeny vlastnosti a složení této směsi. Dále byl proveden výpočet stechiometrie a výpočet entalpie spalín. Dalším krokem bylo navržení žárotrubného výměníku kotle, výpočet účinnosti kotle a obou částí ekonomizéru. V poslední části je uveden postup konstrukce bubnu kotle a určení rychlostí jednotlivých médií. Podle dosažených výsledků z výpočtu jsou navrženy jednotlivé výhřevné plochy a zpracovány výrobní výkresy pro žárotrubný výměník a ekonomizér kotle.

Klíčová slova:

parní kotel; žárotrubný výměník; ekonomizér; bioetanol; spalování; odpad;

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ZELINKA, L. *Medium-Pressure Boiler for the Combustion of Waste Products of the Production of Bioethanol*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2011, 66 p. Thesis head: Kolat, P.

The target of this master thesis was the construction design of the medium-pressure boiler for the combustion of waste products of the production of bioethanol. As a fuel was used a mixture of the two fuels. They were identified characteristics and composition of the mixture. Furthermore, stoichiometry has been calculated and the calculation of enthalpy of combustion products. The next step was to design fire-tube boiler heat exchanger, boiler efficiency and a calculation of the two parts of the economizer. The last section provides a procedure for construction of the boiler drum and determine the speed of the working fluid. According to the results of calculation are proposed various heating surfaces and prepared manufacturing drawings for the fire tube heat exchanger and economizer.

Key words:

steam boiler; fire-tube heat exchanger; economizer; bioethanol; combustion; waste;

Děkuji prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za jeho odborné vedení a podnětné připomínky. Děkuji také, svojí rodině a především svojí ženě za podporu a trpělivost, jakou projevili při vzniku této diplomové práce a v průběhu celého mého snažení.

Lukáš Zelinka

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých značek a symbolů | 9 |
| 1 Úvod | 13 |
| 2 Výroba bioetanolu | 14 |
| 2.1 Rozdělení surovin pro výrobu bioetanolu | 14 |
| 2.1.1 Biomasa obsahující jednoduché cukry | 14 |
| 2.1.2 Biomasa obsahující škrob | 14 |
| 2.1.3 Lignocelulózová biomasa | 14 |
| 2.2 Zpracování odpadu z výroby bioetanolu | 15 |
| 2.2.1 Výroba DDGS | 15 |
| 2.2.2 Anaerobní vyhnívání | 15 |
| 2.2.3 Celkové řešení zpracování výpalků | 15 |
| 3 Koncepce spalovacího zařízení | 17 |
| 3.1 Palivo | 17 |
| 3.1.1 Úprava paliva pro spalování | 17 |
| 3.2 Uspořádání kotle | 18 |
| 3.2.1 Žárotrubný výparník | 19 |
| 3.2.2 Ohřívák vody (ekonomizér) | 20 |
| 4 Tepelný výpočet kotle | 21 |
| 4.1 Parametry kotle - zadání | 21 |
| 4.2 Palivo: Vlastnosti (složení) jednotlivých paliv | 21 |
| 4.2.1 Palivo č. 1 - otruby | 21 |
| 4.2.2 Palivo č. 2 - směs výpalků, kalů z flotace a aerobní pěny | 22 |
| 4.2.3 Konečné palivo jako směs paliva č.1 a č. 2 | 24 |
| 4.3 Výkon kotle | 26 |
| 4.4 Stechiometrie | 27 |
| 4.4.1 Stechiometrie vzduchu | 27 |
| 4.4.2 Stechiometrie spalin | 27 |
| 4.5 Entalpie vzduchu a spalin | 31 |
| 4.5.1 Entalpie vzduchu | 32 |
| 4.5.2 Entalpie spalin | 33 |
| 4.5.3 I - t diagram | 34 |
| 5 Žárotrubná část kotle - 1. tah žárových trubek | 35 |
| 5.1 Geometrie 1. tahu žárových trubek | 35 |
| 5.1.1 Sdílení tepla v 1. tahu žárových trubek | 36 |
| 5.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí | 38 |
| 5.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním v 1. tahu žárových trubek | 39 |
| 5.1.4 Účinnost kotle s ekonomizérem | 40 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6 | Ekonomizér kotle | 42 |
| 6.1 | Rozvržení výhřevných ploch | 42 |
| 6.1.1 | Teploty spalin | 42 |
| 6.1.2 | Bilanční teplo na straně spalin | 42 |
| 6.1.3 | Tepelné výkony v ekonomizéru | 43 |
| 6.1.4 | Teploty napájecí vody v ekonomizéru | 43 |
| 6.2 | 2. Stupeň ekonomizéru | 44 |
| 6.2.1 | Sdílení tepla ve 2. stupni Eka | 47 |
| 6.3 | 1. Stupeň ekonomizéru | 51 |
| 6.3.1 | Sdílení tepla v 1. stupni Eka | 53 |
| 7 | Dimenzování válcového bubnu kotle | 58 |
| 7.1 | Zatížení parního prostoru | 58 |
| 7.1.1 | Zatížení parního prostoru na maximální hladinu | 58 |
| 7.1.2 | Zatížení plochy parního prostoru | 58 |
| 7.2 | Rychlosti média | 59 |
| 7.2.1 | Rychlost syté páry na výstupu z výparníku | 59 |
| 7.2.2 | Rychlost syté páry v navazujícím potrubí | 59 |
| 7.2.3 | Rychlost vody v napájecím potrubí kotle | 60 |
| 8 | Závěr | 61 |
| 9 | Literatura | 62 |
| | Přílohy | 66 |

Seznam použitých značek a symbolů

| SYMBOL | JEDNOTKA | VÝZNAM |
|---------------|---------------------------|---|
| A_t^r | $[-]$ | hmotnostní podíl popele v surovém palivu |
| $A_{ }$ | $[m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$ | souč. zeslabení sálání tříatomovými plyny a parami |
| $B_{ }$ | $[-]$ | celková optická sálavá tloušťka proudu spalin |
| CO_{2max} | $[\%]$ | maximální množství CO_2 ve spalinách |
| F | $[m^2]$ | výhřevná plocha |
| F_{sp} | $[m^2]$ | průtočný průřez na straně spalin |
| $I_{ }$ | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin na výstupu z 1. tahu žárových trubek |
| I_0 | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin na vstupu do 1. tahu žárových trubek |
| I_1 | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin na výstupu z 2. st. eka - vstup do 1. st. |
| I_2 | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin na vstupu do 2. stupně eka |
| I_E | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin na výstupu z 1. st. eka |
| I_K | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin na výstupu z kotle |
| I_{VZmin} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie minimálního množství vzduchu |
| I_{SPmin} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie minimálního množství spalin |
| I_{SP} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva |
| I_{SPv} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie spalin při teplotě spalovacího vzduchu |
| $L_{ 0}$ | $[mm]$ | délka žárových trubek 1. žárového tahu |
| M_{nv} | $[kg \cdot s^{-1}]$ | hmotnostní tok napájecí vody v eku |
| M_p | $[kg \cdot s^{-1}]$ | jmenovitý parní výkon - sekundově |
| M_{pal} | $[kg \cdot s^{-1}]$ | hmotnostní tok paliva |
| M_{pv} | $[kg \cdot s^{-1}]$ | hmotnostní tok paliva skutečně spáleného |
| M_{Pr} | $[-]$ | opravný koeficient |
| M_{λ} | $[-]$ | opravný koeficient |
| M_{ν} | $[-]$ | opravný koeficient |
| O_{Ar} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | objem Ar ve spalinách |
| O_{CO_2} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | objem CO_2 ve spalinách |
| O_{N_2} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | objem N_2 ve spalinách |
| O_{SO_2} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | objem SO_2 ve spalinách |
| O_{H_2Omin} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | minimální objem vodní páry ve spalinách |
| O_{H_2O} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | skutečný objem vodní páry ve spalinách |
| O_{O_2min} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva |
| $O_{SP }$ | $[m^3 \cdot s^{-1}]$ | objemový tok spalin v 1. tahu žárových trubek |
| O_{SP} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | skutečné množství spalin ze spálení 1 kg paliva |
| O_{SPmin} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | min. množ. vlhkých spalin ze spálení 1 kg paliva |
| O_{SPmin}^S | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | min. množ. suchých spalin ze spálení 1 kg paliva |
| O_{VZ} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | skut. množ. vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva |
| O_{VZmin} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | min. množ. vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva |
| O_{VZmin}^S | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | min. množ. suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva |
| P | $[kW]$ | tepelný příkon kotle |
| Pr | $[-]$ | prandtlovo číslo při střední teplotě spalin |
| Q | $[kW]$ | výkon předaný v 1. tahu žárových trubek |
| Q_1 | $[kW]$ | tepelný výkon pro 1. stupeň Eka |

| SYMBOL | JEDNOTKA | VÝZNAM |
|-------------|----------------------------------|---|
| Q_{EB} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | bilanční teplo ekonomizéru |
| Q_i^r | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | výhřevnost směsi |
| Q_{iD}^r | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | výhřevnost paliva podle Dulonga |
| Q_{iM}^r | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | výhřevnost paliva podle Mendělejeva |
| Q_{iON}^r | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | výhřevnost paliva podle ON 070417 |
| Q_{iS}^r | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | výhřevnost paliva podle statistického vzorce |
| Q_K | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | teplo převzaté výhřevnou plochou 1. žárového tahu |
| Q_F | $[kW]$ | tepelný výkon předaný prostupem stěnou trubky |
| Q_V | $[kW]$ | jmenovitý tepelný výkon kotle |
| S^r | $[-]$ | veškerá síra v palivu - průměrně |
| S_m^r | $[gS \cdot MJ^{-1}]$ | měrná sirnatost |
| S_{SO4} | $[\%]$ | síra síranová |
| $S_{ }$ | $[m^2]$ | průtočný průřez spalin 1. žárového tahu |
| S_W | $[m^2]$ | průtočný průřez vody |
| T_{00} | $[K]$ | absolutní střední teplota spalin v 1. žárovém tahu |
| $T_{ZA }$ | $[K]$ | absolutní teplota zanešeného povrchu trubky |
| V_{VZN} | $[m^3 \cdot s^{-1}]$ | potřeba spalovacího vzduchu při jmen. výkonu kotle |
| V_{SPN1} | $[m^3 \cdot s^{-1}]$ | objemový tok spalin při jmenovitém výkonu kotle |
| W_t^r | $[-]$ | hmotnostní podíl vody v surovém palivu |
| X_p | $[\%]$ | procento popelu v úletu |
| a | $[mm]$ | šířka kanálu v podélném směru trubek |
| $a_{sn }$ | $[-]$ | stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu |
| a_{st} | $[-]$ | stupeň černosti povrchu stěn |
| c | $[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$ | měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu |
| $c_{L }$ | $[-]$ | oprava na poměrnou délku |
| $c_{m }$ | $[-]$ | oprava v prstencových potrubích |
| c_S | $[-]$ | oprava na poměrné rozteče |
| $c_{t }$ | $[-]$ | oprava na teplotu proudu spalin a stěny |
| c_z | $[-]$ | oprava na počet podélných řad |
| d | $[g \cdot kg^{-1}]$ | obsah vody ve vzduchu |
| d_0 | $[mm]$ | vnější průměr trubek 1. žárového tahu |
| d_1 | $[mm]$ | vnější průměr trubek 1. stupně eka |
| $d_{ 0}$ | $[mm]$ | vnitřní průměr žárových trubek 1. žárového tahu |
| $d_{ 1}$ | $[mm]$ | vnitřní průměr trubek 1. stupně eka |
| h | $[mm]$ | hloubka kanálu |
| h^r | $[-]$ | hmotnostní podíl hořlaviny v surovém palivu |
| i | $[ks]$ | počet trubek 1. žárového tahu |
| i_1 | $[ks]$ | počet trubek 1. stupně eka |
| i_{nv} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie napájecí vody |
| i_{nv1} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie napájecí vody na výstupu z 1. stupně eka |
| i_{nv2} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie napájecí vody na výstupu z 2. stupně eka |
| i_p | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | entalpie syté páry |
| k | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | součinitel prostupu tepla v 1. tahu žárových trubek |
| k_1 | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | součinitel prostupu tepla v 1. stupni eka |

| SYMBOL | JEDNOTKA | VÝZNAM |
|-----------------|---------------------------------|--|
| l_1 | $[m]$ | délka trubek v 1. stupni eka |
| p | $[MPa(a)]$ | jmenovitý absolutní tlak syté páry |
| p_K | $[kPa]$ | podtlak (tah) za kotlem |
| $p_{ }$ | $[kPa]$ | tlak (tah) spalin v 1. tahu žárových trubek - střední |
| $p_{ 1}$ | $[MPa]$ | tlak v 1. tahu žárových trubek |
| p_{S1} | $[MPa(a)]$ | střední tlak vody v 1. stupni eka |
| $p_{SP }$ | $[MPa]$ | celkový parciální tlak tříatomových plynů |
| p_n | $[kPa]$ | normální barometrický tlak |
| p_b | $[kPa]$ | obvyklý barometrický tlak |
| $q_{ }$ | $[kW \cdot m^{-2}]$ | zatížení výhřevné plochy 1. tahu žárových trubek |
| q_1 | $[kW \cdot m^{-2}]$ | měrné zatížení výhřevné plochy v 1. stupni eka |
| $s_{ }$ | $[m]$ | střední efektivní tloušťka sálavé vrstvy 1. t. ž. t. |
| $s_{ 0}$ | $[mm]$ | tloušťka stěny trubek 1. žárového tahu |
| $s_{ 1}$ | $[mm]$ | tloušťka stěny trubek 1. stupně eka |
| s_{12} | $[mm]$ | příčná rozteč ve 2. stupni eka |
| s_{22} | $[mm]$ | podélná rozteč ve 2. stupni eka |
| s_{12} | $[mm]$ | příčná rozteč ve 2. stupni eka |
| s_{22} | $[mm]$ | podélná rozteč ve 2. stupni eka |
| t_{nv} | $[^{\circ}C]$ | teplota napájecí vody |
| t_{nv1} | $[^{\circ}C]$ | teplota napájecí vody na výstupu z 1. stupně eka |
| t_{nv2} | $[^{\circ}C]$ | teplota napájecí vody na výstupu z 2. stupně eka |
| t_{SAT} | $[^{\circ}C]$ | teplota syté páry |
| t_{S1} | $[^{\circ}C]$ | střední teplota vody v 1. stupni eka |
| t_{VZ} | $[^{\circ}C]$ | teplota vzduchu |
| v_{S1} | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ | měrný objem napájecí vody v 1. stupni eka |
| w_{N1} | $[m \cdot s^{-1}]$ | rych. spalin v 1. st. eka vztažená na $0^{\circ}C$; 101325 Pa |
| w_S | $[m \cdot s^{-1}]$ | střední rychlost spalin |
| w_{W1} | $[m \cdot s^{-1}]$ | rychlost vody v 1. stupni eka |
| z_1 | $[ks]$ | počet trubek ve svazku 1. stupně eka |
| z_2 | $[ks]$ | počet trubek ve svazku 2. stupně eka |
| z_{TR1} | $[ks]$ | počet trubek v nejužším průřezu s délkou l_1 |
| z_{TR2} | $[ks]$ | počet trubek v nejužším průřezu s délkou l_2 |
| Δt | $[^{\circ}C]$ | teplotní spád v 1. tahu žárových trubek |
| Δt_1 | $[^{\circ}C]$ | teplotní spád v 1. stupni eka |
| $\Delta t_{N }$ | $[^{\circ}C]$ | absolutní teplota pro spalování dřevní hmoty |
| $\Delta \tau$ | $[^{\circ}C]$ | nedohřev do bodu varu |
| Σ_t^r | $[-]$ | součet hmot. podílů konečné směsi paliva č. 1 a 2 |
| α | $[-]$ | součinitel přebytku vzduchu |
| α_1 | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | souč. přestupu tepla ze spalin do stěny v 1. st. eka |
| α_K | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | součinitel přestupu tepla konvekcí 1. t. ž. t. |
| α_{K1} | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | souč. přest. tepla konvekcí v 1. st. eka |
| α_S | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | součinitel přestupu tepla sáláním v 1. žárovém tahu |
| α_{S1} | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | souč. přestupu tepla sáláním v 1. st. eka |
| ϵ | $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$ | součinitel zanešení |
| $\phi_{ }$ | $[-]$ | součinitel uchování tepla |

| SYMBOL | JEDNOTKA | VÝZNAM |
|-------------------|---------------------------------|---|
| $\phi_{\sigma 1}$ | [-] | parametr uspořádání trubek v 1. stupni eka |
| η_K | [%] | účinnost kotle |
| λ | $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ | součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě |
| μ | $[g \cdot m^{-3}]$ | koncentrace popílku ve spalínách |
| ν | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | kinematická viskozita při střední teplotě spalín |
| θ_0 | $[^{\circ}C]$ | teplota spalín na vstupu do 1. tahu |
| θ_1 | $[^{\circ}C]$ | teplota spalín na výstupu z 2. st. eka - vstup do 1. st. |
| θ_2 | $[^{\circ}C]$ | teplota spalín na výstupu z 1. tahu |
| θ_E | $[^{\circ}C]$ | teplota spalín na výstupu z 1. st. eka |
| θ_K | $[^{\circ}C]$ | teplota spalín za kotlem |
| θ_{S1} | $[^{\circ}C]$ | střední teplota spalín v 1. tahu žárových trubek |
| σ_{11} | [-] | poměrná příčná rozteč v 1. stupni eka |
| σ_{12} | [-] | poměrná příčná rozteč ve 2. stupni eka |
| σ_{21} | [-] | poměrná podélná rozteč v 1. stupni eka |
| σ_{22} | [-] | poměrná podélná rozteč ve 2. stupni eka |
| σ_{U1} | [-] | poměrná úhlopříčná rozteč v 1. stupni eka |
| σ_{U2} | [-] | poměrná úhlopříčná rozteč ve 2. stupni eka |
| ω_{O_2} | [%] | objemový podíl kyslíku ve spalínách |
| ψ_1 | [-] | součinitel tepelné efektivity při spalování dřeva |
| ξ_C | [%] | poměrná ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích |
| ξ_K | [%] | komínová ztráta |
| ξ_O | [%] | poměrná ztráta chemickým nedopalem |
| ξ_{SO} | [%] | poměrná ztráta sdílením tepla do okolí |
| ζ_1 | [-] | součinitel využití |
| (g) | | gauge, přetlak, tlak v kotli vztažený k atmosférickému tlaku, údaj na manometru kotle |
| (a) | | absolutní tlak |

Význam indexů:

| index | význam |
|--------------------|-----------------------------------|
| index ₁ | 1. tah žárových trubek |
| index ₂ | 2. stupeň ekonomizéru |
| index _E | celý ekonomizér |
| index ^r | palivo v surovém stavu |
| index ^d | palivo v bezvodném stavu - sušina |

1 Úvod

Při neustálých pokusech o snižování skleníkových plynů, které souvisí s globálním oteplováním, přichází na řadu nahrazení fosilních paliv biopalivy [24]. Za jedno z nejvýhodnějších biopaliv v tomto směru je považován bioetanol.

Do širšího povědomí se dostal díky ropné krizi v 70. letech, kdy se také hledaly alternativy k fosilním palivům. Největší měrou se na výrobě bioetanolu podílí USA spolu s Brazílií, jejichž součet přesahuje 80 % veškeré produkce bioetanlu na světě [24].

Bioetanol je kvasný líh, jenž má poměrně vysokou výhřevnost. Používá se především jako palivo ve formě příměsi do benzínu a nafty. Vzniklé spaliny neobsahují popel a síru a mají nižší podíl oxidu uhličitého a oxidů dusíku než klasický benzín [25]. Výroba bioetanolu je popsána v kapitole 2.

V Evropě a ČR se dostávají biopaliva do popředí teprve v posledních letech, a to zejména díky Evropské komisi a její směrnici 2009/28 EC, jež definuje cíl 20 % podílu obnovitelných zdrojů na celkové výrobě energie do roku 2025.

Odpadní produkty (výpalky) z výroby bioetanolu je možné použít jako krmivo pro hospodářská zvířata. Pro tento druh zpracování se používá metoda DDGS viz. 2.2.1.

Další variantou je spalování takového odpadu ve spalovacím zařízení. Tímto způsobem se využije zbývajících energetických potenciálů výpalků, kterým můžeme dosáhnout snížení vlastní spotřeby lihovaru viz. 2.2.3. Výhodou takového řešení je také jistá nezávislost na vnějším trhu s palivy, jelikož spalujeme již jednou zpracovanou surovinu a palivo, které si sami vyprodukujeme.

Díky vlastnostem a složení paliva připadají v úvahu dva způsoby spalování. Prvním je spalování v kotli s cirkulující fluidní vrstvou. Tento způsob je výhodný díky nízkým teplotám v průběhu spalování.

Druhým způsobem je spalování v kotli s klasickým roštem. V tomto případě se jedná o kaskádový bezpropadový přesuvný rošt. Podrobněji je konstrukce popsána v kapitole 3.2. V této práci je řešen návrh a konstrukční provedení některých částí takového spalovacího zařízení.

2 Výroba bioetanolu

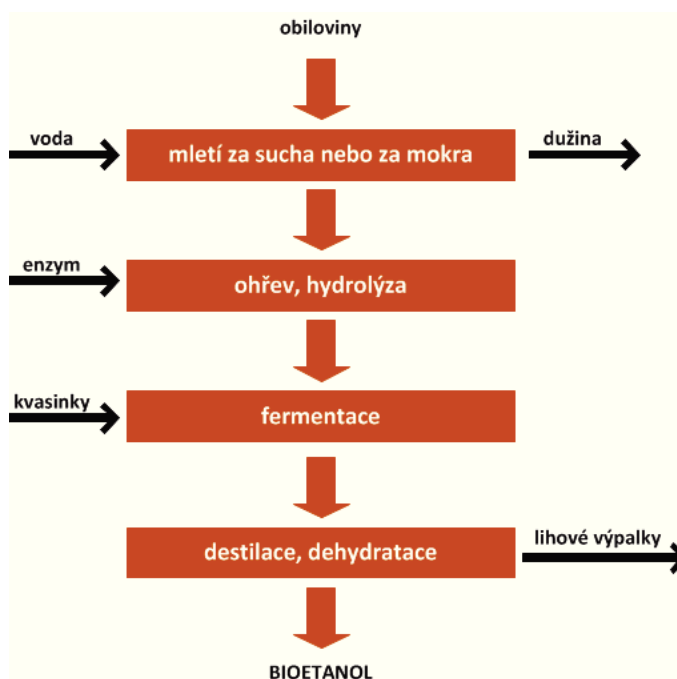
2.1 Rozdělení surovin pro výrobu bioetanolu

2.1.1 Biomasa obsahující jednoduché cukry

Jedná se především o cukrovou třtinu a cukrovou řepu. V našich podmínkách připadá v úvahu především cukrová řepa, jelikož pro pěstování cukrové třtiny nemáme vhodné klimatické podmínky. Navíc se při pěstování cukrové řepy dosahuje vyšších výnosů, které představuje množství bioetanolu na hektar, než při výrobě bioetanolu z obilí [24].

2.1.2 Biomasa obsahující škrob

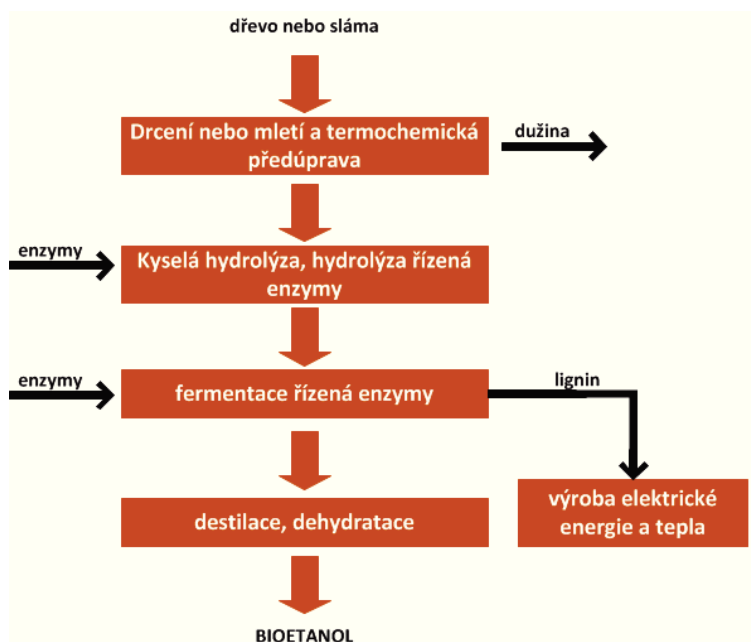
U této suroviny, kterou představují obiloviny, brambory a kukuřice, je dominantní obsah škrobu, který se nejprve musí přeměnit na jednoduchý cukr, ze kterého následně anaerobním kvašením vzniká bioetanol. Tento způsob přeměny je nejrozšířenějším pro výrobu bioetanolu v Severní Americe a Evropě [24]. Na Obr. 2.1 je schéma výroby bioetanolu.



Obr. 2.1 Výroba bioetanolu z biomasy obsahující škrob [24]

2.1.3 Lignocelulózová biomasa

Lignocelulózovou biomasu představují dřevo, dřevní odpad, energetické plodiny a také zbytky ze zemědělské výroby, jako je sláma. Výroba bioetanolu z tohoto druhu biomasy je příslibem do budoucnosti, protože se pro výrobu nevyužívají přímé zdroje potravin (obiloviny). To je v současnosti velmi kritizováno z ohledem na nedostatek potravin v některých částech světa. Nicméně způsob výroby z lignocelulózové biomasy, který je zobrazen na Obr. 2.2, má před sebou ještě dlouhou cestu a technologie je poměrně složitá.



Obr. 2.2 Výroba bioetanolu z lignocelulózové biomasy [24]

2.2 Zpracování odpadu z výroby bioetanolu

Jedná se především o lihovarnické výpalky, zbytek po destilaci. Obsahem jsou nefermentované podíly obilí (surové proteiny, surový tuk, D lysin a voda) [27].

2.2.1 Výroba DDGS

Distillers Dried Grains with Solubles - sušené výpalky z výroby bioetanolu. V současné době nejpoužívanější druh zpracování. Při zpracování dochází k vypaření veškeré vody z výpalků. Suché výpalky jsou pak použity jako krmivo pro hospodářská zvířata.

2.2.2 Anaerobní vyhnívání

Všechny výpalky se využijí ve vyhnívacích nádržích, ve kterých vzniká nekvalitní bioplyn. Problémem je separace kalů po vyhnití, což má za následek náročné aerobní čištění. K tomuto způsobu využití je nutné velké množství elektrické energie [28].

2.2.3 Celkové řešení zpracování výpalků

Na Obr. 2.3 je znázorněno celkové řešení použití výpalků jako paliva pro technologii v rámci celkového řešení lihovaru. Tento způsob zahrnuje maximální využití energetického potenciálu výpalků a omezuje výsledný odpad z výroby bioetanolu na minimum. Díky svojí komplexnosti, a tím pádem také značnému rozsahu, je však investičně náročnější [28]. V této technologii je zahrnuta také výroba bioplynu, který je použit buď jako pomocné palivo nebo jako palivo pro plynový kotel.

3 Koncepce spalovacího zařízení

3.1 Palivo

Pro kotel bude použito palivo jako směs dvou paliv.

Palivo č. 1 jsou obilné otruby. Jejich složení je uvedeno v kapitole 4.2.1. Otruby jsou po mletí sypké a pro spalování se nijak speciálně neupravují. Palivo je z hlediska svého složení standardní a výrazně se neliší od běžných hodnot obilných biopaliv. Obsah vody v surovém stavu je 9,98 %. Také obsah popela 5,84 % je v obvyklém intervalu 5 - 10 % pro podobná paliva.



Obr. 3.1 Otruby ve spalovací komoře

Největším problémem tohoto paliva je jeho sypkost. Díky sypkosti může docházet k nerovnoměrnému přikládání na rošt a také může mít za následek částečné klenbování paliva v zásobníku.

Palivo č. 2 jsou výpalky, kaly z flotace a aerobní pěny. Podle složení viz. kapitola 4.2.2 se podobá palivu č. 1, ale obsah veškeré vody v surovém palivu 18,25 % ovlivní celkové složení a především výhřevnost.

Konečné palivo je směsí obou těchto paliv. Jednotlivá paliva jsou ve směsi zastoupena v poměru 34,8 % palivo č. 1 a 65,2 % palivo č. 2.

3.1.1 Úprava paliva pro spalování

V prvotní fázi při výstupu z technologie obsahují výpalky 95 % vody. Pomocí dekantérů na odstředění výpalků dosáhneme odvodnění na cca 30 % sušiny, tedy na 70 % vody. V dalším kroku se výpalky vysuší ve dvourotorové sušárně Obr. 3.2 na konečný obsah vody cca 20 %. Tato sušárna je kontinuální a topným médiem je sytá pára.

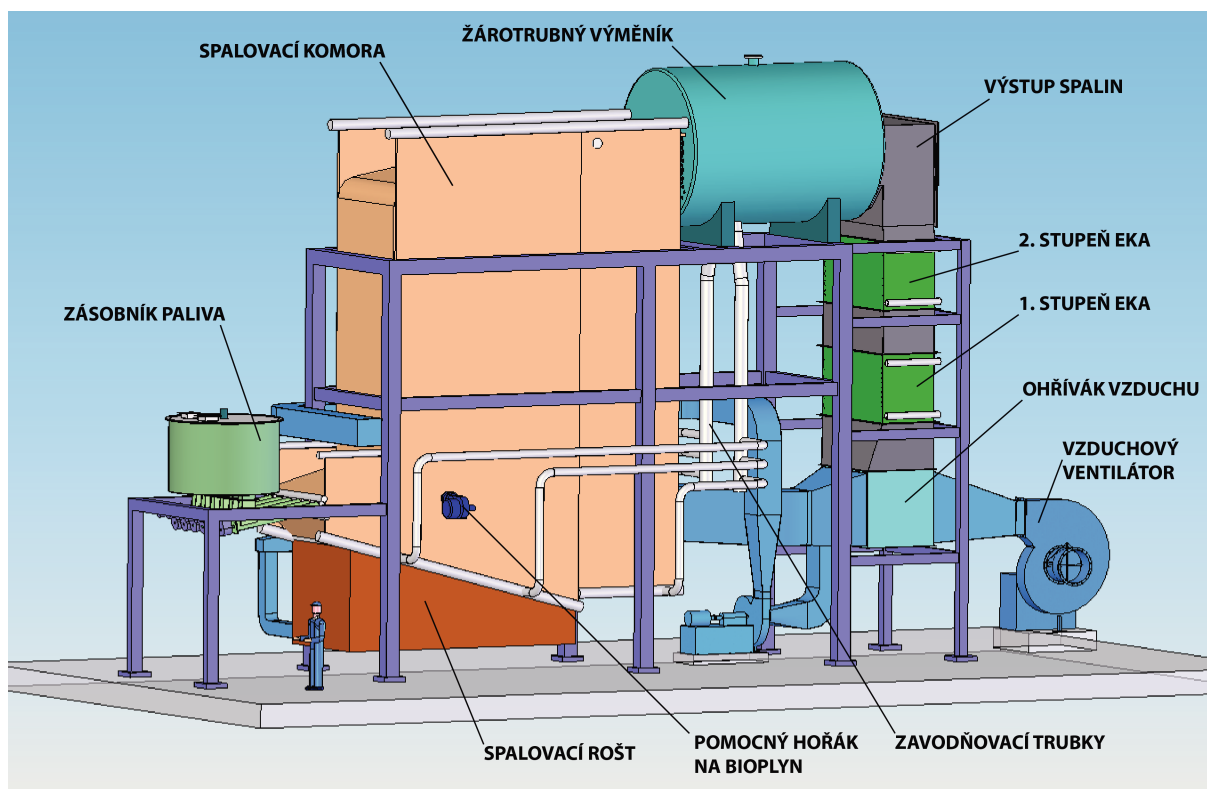
Vysušené výpalky se uskladňují v zásobníku v těsné blízkosti kotle. V samostatném zásobníku se skladují také obilné otruby. Před samotným vstupem do kotle dochází k jejich vzájemnému smíchání v zásobníku umístěném nad podavači paliva.



Obr. 3.2 Dvourotorová sušárna [28]

3.2 Uspořádání kotle

Kotel VSB-18000 se skládá z jednotlivých částí, které jsou zřejmé z Obr. 3.3. Jedná se o středotlaký kotel produkující sytou páru o teplotě 191,61 °C při tlaku 12 bar(g). Ve spodní části je umístěn kaskádový bezpropadový přesuvný rošt, na který je přiváděno palivo pomocí podavačů. Pod rošt je zaveden ohřátý spalovací vzduch z ohříváku vzduchu.



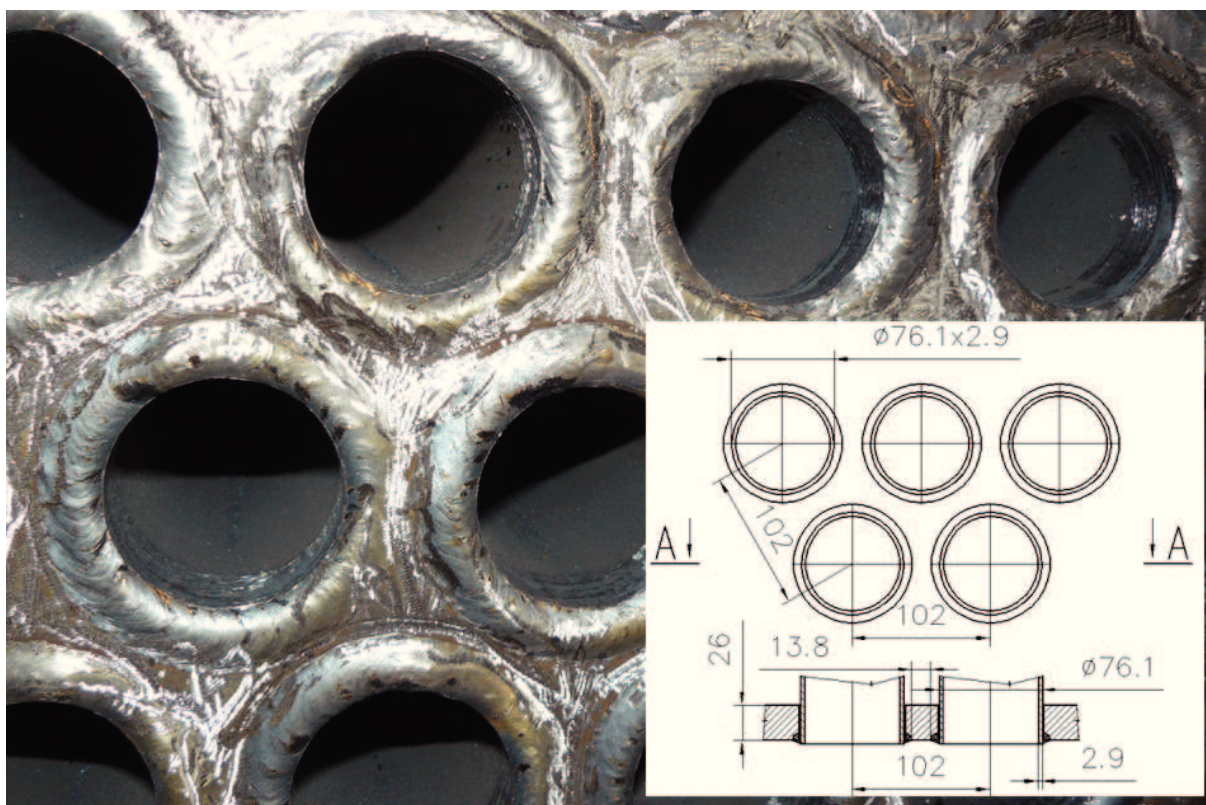
Obr. 3.3 Rozvržení kotle VSB-18000 [21]

Spalovací komora je z části chlazená pomocí zavodňovacích trubek. Na spalovací komoru navazuje žárotrubný výparník, ve kterém se generuje sytá pára a zároveň slouží k zavodnění spalovací komory.

Dalším prvkem ve spalínovém tahu je dvoustupňový ohřívák vody následovaný ohřívákem vzduchu. Odtud vstupují spaliny do rukávového filtru, ve kterém se odfiltruje asi 35 procentní úlet popeloviny. Vyfiltrované spaliny přes spalínový ventilátor projdou do komína [20]. Rozvržení teplot a tlaků v jednotlivých částech kotle je patrné z Obr. 6.3.

3.2.1 Žárotrubný výparník

Jedná se o válcový žárotrubný výparník s přirozenou cirkulací. Umístěný je za spalovací komorou na podpěrné konstrukci. Rozměry a jednotlivé komponenty jsou patrné z Přílohy B. Buben je tvořen válcovým pláštěm a k němu přivařenými rovnými dny s lemem. Dna jsou vyztužena svazkem žárových trubek a také rohovými výztuhami. Místek mezi jednotlivými žárovými trubkami a jejich přivaření je na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Přivaření žárových trubek k čelu tělesa kotle

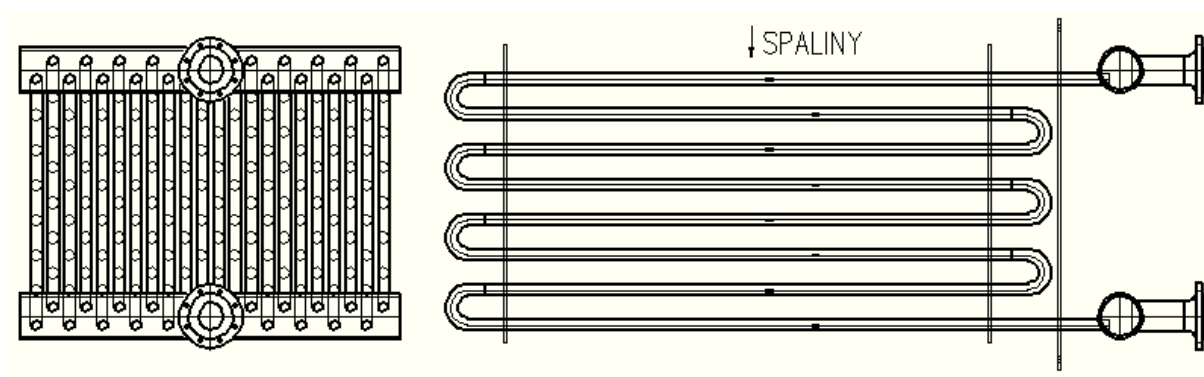
Ve spodní části tělesa jsou 2 trubky DN 250 PN40, které plní funkci zavodňovacích trubek chlazení spalovací komory. K přednímu čelu kotle jsou také přivařeny trubky, které plní funkci vyváděcích trubek ze spalovací komory, která je z části tvořena membránovými stěnami. Pro vnitřní revizi je kotel vybaven průlezem o rozměru 320 x 420 mm a čistícím víkem DN 300 PN 40. Na spodní straně bubnu je umístěno potrubí odkalování a vypouštění kotle.

Na kotli je dále umístěna kolona vodoznaků, která současně slouží jako komora pro BoSB a pro osazení manometry a manostaty. V tělese je rovněž hrdlo odluhu, sondy odluhu a také hrdlo napájení kotle. Napájení je řešeno zavedením trubky pod minimální hladinu. Kotel je napájen vodou ohřátou na $141\text{ }^{\circ}\text{C}$ pomocí dvoustupňového ekonomizéru.

Na nejvyšším místě výparníku je kotel osazen pojistným ventilem. Buben je uložen na dvou sedlových podporách umístěných na celkové konstrukci.

3.2.2 Ohřívák vody (ekonomizér)

Ekonomizér je řešen jako dvoustupňový neodpařovací ohřívák vody. Je umístěn ve svislém spalínovém kanálu Obr. 3.3. Jednotlivé stupně jsou tvořeny několika hady trubek, které tvoří vystřídaný svazek a jsou zavedeny do sběrných komor viz. Příloha D a E.



Obr. 3.5 Příklad vystřídaného svazku a trubkového hada

Do prvního stupně ekonomizéru (Příloha E) vstupuje voda z napájecí nádrže o teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku 16 bar(g) . Ta je v tomto stupni ohřata na $118,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Do druhého stupně tedy vstupuje ohřátá voda o teplotě $118,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ve druhém stupni se následně ohřeje na teplotu $141,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při této teplotě vstupuje přes napájecí jehlu do bubnu kotle. Mezitím voda přišla díky vnitřním odporům ekonomizéru o část tlakové energie a vstupuje tak do bubnu pod tlakem 13 bar(g) .

4 Tepelný výpočet kotle

Není - li uvedeno jinak jsou všechny hodnoty (objemy, entalpie) vztaženy na 1 kg spáleného paliva při normálních podmínkách 0 °C; 101,325 kPa.

4.1 Parametry kotle - zadání

| | | |
|---|-------|-------------------------|
| Jmenovitý parní výkon | 18000 | [kg · h ⁻¹] |
| Jmenovitý pracovní přetlak | 12 | [bar (g)] |
| Jmenovitá teplota napájecí vody | 105 | [°C] |
| Teplota spalin na vstupu do konvekčního tahu | 790 | [°C] |
| Doporučená teplota spalin na výstupu z žárotrubné části | 360 | [°C] |
| Doporučená hodnota přebytku vzduchu | 1,6 | [-] |

4.2 Palivo: Vlastnosti (složení) jednotlivých paliv

Jako palivo je použito odpadních produktů z výroby bioetanolu. Konkrétně pak palivo tvoří směs dvou paliv. Palivo č.1 otruby, palivo č. 2 směs výpalků, kalů z flotace a aerobní pěny.

4.2.1 Palivo č. 1 - otruby

Složení ve spalovaném stavu (střední). Střední hmotnostní podíly [-]; původní - surové palivo

| | | | |
|--------|-----------------------|-------|------------------------|
| uhlík | $C_{t1}^r = 0,418364$ | vodík | $H_{t1}^r = 0,056881$ |
| síra | $S_{t1}^r = 0,002777$ | dusík | $N_{t1}^r = 0,024907$ |
| kyslík | $O_{t1}^r = 0,338511$ | chlor | $Cl_{t1}^r = 0,000213$ |
| fluor | $F_{t1}^r = 0,000194$ | voda | $W_{t1}^r = 0,0998$ |
| popel | $A_{t1}^r = 0,058353$ | | |

Součet hmotnostních podílů paliva č. 1 ve spalovaném stavu:

$$\Sigma_{t1}^r = C_{t1}^r + H_{t1}^r + S_{t1}^r + O_{t1}^r + N_{t1}^r + Cl_{t1}^r + F_{t1}^r + W_{t1}^r + A_{t1}^r = 1 \quad [-] \quad (1)$$

Výhřevnost paliva podle Mendělejeva:

$$Q_{iM1}^r = [339 \cdot C_{t1}^r + 1030 \cdot H_{t1}^r - 103 \cdot (O_{t1}^r - S_{t1}^r)] \cdot 100 - 24,5 \cdot W_{t1}^r \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (2)$$

$$Q_{iM1}^r = [339 \cdot 0,418364 + 1030 \cdot 0,056881 - 103 \cdot (0,338511 - 0,002777)] \cdot 100 - 24,5 \cdot 0,0998 = 16580,777 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost paliva podle Dulonga:

$$Q_{iD1}^r = (33,91 \cdot C_{t1}^r + 121,42 \cdot H_{t1}^r - 15,18 \cdot O_{t1}^r + 10,47 \cdot S_{t1}^r - 2,45 \cdot W_{t1}^r) \cdot 1000 \quad (3)$$

$$Q_{iD1}^r = (33,91 \cdot 0,418364 + 121,42 \cdot 0,056881 - 15,18 \cdot 0,338511 + 10,47 \cdot 0,002777 - 2,45 \cdot 0,0998 \cdot 1000 = 15739,182 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost paliva podle ON 070417:

$$Q_{iON1}^r = [338 \cdot C_{t1}^r + 978 \cdot H_{t1}^r - 103 \cdot (O_{t1}^r - S_{t1}^r) - 24,5 \cdot W_{t1}^r] \cdot 100 \quad (4)$$

$$Q_{iON1}^r = [338 \cdot 0,418364 + 978 \cdot 0,056881 - 103 \cdot (0,338511 - 0,002777) - 24,5 \cdot 0,0998] \cdot 100 = 16001,095 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost paliva podle statistického vzorce:

- vzorec platný pro určení výhřevnosti česko-slovenských paliv od koksu po dřevo

$$Q_{iS1}^r = [347,5 \cdot C_{t1}^r + 953 \cdot H_{t1}^r - 109 \cdot (O_{t1}^r - S_{t1}^r) - 25 \cdot W_{t1}^r] \cdot 100 \quad (5)$$

$$Q_{iS1}^r = [347,5 \cdot 0,418364 + 953 \cdot 0,056881 - 109 \cdot (0,338511 - 0,002777) - 25 \cdot 0,0998] \cdot 100 = 16049,908 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost surového paliva č. 1 - střední průměr:

$$Q_{i1}^r = \frac{Q_{iMr1} + Q_{iDr1} + Q_{iONr1} + Q_{iSr1}}{4} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (6)$$

$$Q_{i1}^r = \frac{16580,777 + 15739,182 + 16001,095 + 16049,908}{4} = 16092,741 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

4.2.2 Palivo č. 2 - směs výpalků, kalů z flotace a aerobní pěny

Složení v bezvodném stavu (střední). Střední hmotnostní podíly [-]; sušina - bezvodné palivo

| | | | |
|--------|--------------------|-------|---|
| uhlík | $C_2^d = 0,491314$ | vodík | $H_2^d = 0,063452$ |
| síra | $S_2^d = 0,005046$ | dusík | $N_2^d = 0,051062$ |
| kyslík | $O_2^d = 0,333148$ | chlor | $Cl_2^d = 0,000434$ |
| fluor | $F_2^d = 0,000294$ | voda | $W_{t2}^r = 0,1825$ - veškerá voda v surovém palivu |
| popel | $A_2^d = 0,055253$ | | |

Složení v surovém (spalovaném) stavu (střední). Střední hmotnostní podíly [-]; surové palivo, ve spalovaném stavu

uhlík:

$$C_{t2}^r = C_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,491314 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,40165 \quad (7)$$

vodík:

$$H_{t2}^r = H_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,063452 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,05187 \quad (8)$$

síra:

$$S_{t2}^r = S_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,005046 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,00413 \quad (9)$$

dusík:

$$N_{t2}^r = N_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,051062 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,04174 \quad (10)$$

kyslík:

$$O_{t2}^r = O_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,333148 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,27235 \quad (11)$$

chlor:

$$Cl_{t2}^r = Cl_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,000434 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,00035 \quad (12)$$

fluor:

$$F_{t2}^r = F_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,000294 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,00024 \quad (13)$$

popel:

$$A_{t2}^r = A_2^d \cdot \frac{1 - W_{t2}^r}{1} = 0,055253 \cdot \frac{1 - 0,1825}{1} = 0,045169 \quad (14)$$

Součet hmotnostních podílů paliva č. 2 ve spalovaném stavu:

$$\Sigma_{t2}^r = C_{t2}^r + H_{t2}^r + S_{t2}^r + O_{t2}^r + N_{t2}^r + Cl_{t2}^r + F_{t2}^r + W_{t2}^r + A_{t2}^r = 1 \quad [-] \quad (15)$$

Výhřevnost paliva podle Mendělejeva:

$$Q_{iM2}^r = [339 \cdot C_{t2}^r + 1030 \cdot H_{t2}^r - 103 \cdot (O_{t2}^r - S_{t2}^r)] \cdot 100 - 24,5 \cdot W_{t2}^r \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (16)$$

$$Q_{iM2}^r = [339 \cdot 0,40165 + 1030 \cdot 0,05187 - 103 \cdot (0,27235 - 0,00413)] \cdot 100 - 24,5 \cdot 0,1825 = 16191,553 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost paliva podle Dulonga:

$$Q_{iD2}^r = 33,91 \cdot C_{t2}^r + 121,42 \cdot H_{t2}^r - 15,18 \cdot O_{t2}^r + 10,47 \cdot S_{t2}^r - 2,45 \cdot W_{t2}^r \cdot 1000 \quad (17)$$

$$Q_{iD2}^r = (33,91 \cdot 0,40165 + 121,42 \cdot 0,05187 - 15,18 \cdot 0,27235 + 10,47 \cdot 0,00413 - 2,45 \cdot 0,1825) \cdot 1000 = 15380,038 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost paliva podle ON 070417:

$$Q_{iON2}^r = [338 \cdot C_{t2}^r + 978 \cdot H_{t2}^r - 103 \cdot (O_{t2}^r - S_{t2}^r) - 24,5 \cdot W_{t2}^r] \cdot 100 \quad (18)$$

$$Q_{iON2}^r = [338 \cdot 0,40165 + 978 \cdot 0,05187 - 103 \cdot (0,27235 - 0,00413) - 24,5 \cdot 0,1825] \cdot 100 = 15439 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost paliva podle statistického vzorce:

- vzorec platný pro určení výhřevnosti česko-slovenských paliv od koksu po dřevo

$$Q_{iS2}^r = [347,5 \cdot C_{t2}^r + 953 \cdot H_{t2}^r - 109 \cdot (O_{t2}^r - S_{t2}^r) - 25 \cdot W_{t2}^r] \cdot 100 \quad (19)$$

$$Q_{iS2}^r = [347,5 \cdot 0,40165 + 953 \cdot 0,05187 - 109 \cdot (0,27235 - 0,00413) - 25 \cdot 0,1825] \cdot 100 = 15520,827 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost surového paliva č. 2 - střední průměr:

$$Q_{i2}^r = \frac{Q_{iM2}^r + Q_{iD2}^r + Q_{iON2}^r + Q_{iS2}^r}{4} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (20)$$

$$Q_{i2}^r = \frac{16191,553 + 15380,038 + 15439 + 15520,827}{4} = 15632,854 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

4.2.3 Konečné palivo jako směs paliva č.1 a č. 2

Poměrné hmotnostní podíly [-]; surové palivo ve spalovném stavu

Poměr paliva č. 1 ve směsi: 34,8% $\Rightarrow p_1 = 34,8/100 = 0,348$

Poměr paliva č. 2 ve směsi: 65,2% $\Rightarrow p_2 = 65,2/100 = 0,652$

Kontrola:

$$p_1 + p_2 = 0,348 + 0,652 = 1 \quad [-]$$

uhlík:

$$C_t^r = C_{t1}^r \cdot p_1 + C_{t2}^r \cdot p_2 = 0,418364 \cdot 0,348 + 0,40165 \cdot 0,652 = 0,407 \quad [-] \quad (21)$$

vodík:

$$H_t^r = H_{t1}^r \cdot p_1 + H_{t2}^r \cdot p_2 = 0,056881 \cdot 0,348 + 0,05187 \cdot 0,652 = 0,054 \quad [-] \quad (22)$$

Síra:

$$S_t^r = S_{t1}^r \cdot p_1 + S_{t2}^r \cdot p_2 = 0,002777 \cdot 0,348 + 0,00413 \cdot 0,652 = 0,003656 \quad [-] \quad (23)$$

dušík:

$$N_t^r = N_{t1}^r \cdot p_1 + N_{t2}^r \cdot p_2 = 0,024907 \cdot 0,348 + 0,04174 \cdot 0,652 = 0,035884 \quad [-] \quad (24)$$

kyslík:

$$O_t^r = O_{t1}^r \cdot p_1 + O_{t2}^r \cdot p_2 = 0,338511 \cdot 0,348 + 0,27235 \cdot 0,652 = 0,295373 \quad [-] \quad (25)$$

chlor:

$$Cl_t^r = Cl_{t1}^r \cdot p_1 + Cl_{t2}^r \cdot p_2 = 0,000213 \cdot 0,348 + 0,00035 \cdot 0,652 = 0,000305 \quad [-] \quad (26)$$

fluor:

$$F_t^r = F_{t1}^r \cdot p_1 + F_{t2}^r \cdot p_2 = 0,000194 \cdot 0,348 + 0,00024 \cdot 0,652 = 0,000224 \quad [-] \quad (27)$$

voda:

$$W_t^r = W_{t1}^r \cdot p_1 + W_{t2}^r \cdot p_2 = 0,0998 \cdot 0,348 + 0,1825 \cdot 0,652 = 0,154 \quad [-] \quad (28)$$

popel:

$$A_t^r = A_{t1}^r \cdot p_1 + A_{t2}^r \cdot p_2 = 0,058353 \cdot 0,348 + 0,045169 \cdot 0,652 = 0,05 \quad [-] \quad (29)$$

Součet hmotnostních podílů konečné směsi paliva č. 1 a 2 ve spalovaném stavu:

$$\Sigma_t^r = C_t^r + H_t^r + S_t^r + O_t^r + N_t^r + Cl_t^r + F_t^r + W_t^r + A_t^r = 1 \quad [-] \quad (30)$$

Výhřevnost směsi paliva č.1 a č.2 v původním, spal. stavu - pomocí hmot. podílů:

$$Q_{iZ}^r = Q_{i1}^r \cdot p_1 + Q_{i2}^r \cdot p_2 = 16092,741 \cdot 0,348 + 15632,854 \cdot 0,652 = 15792,89 \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (31)$$

Měrná sirnatost:

$$S_m^r = \frac{10 \cdot S_t^r \cdot 100000}{Q_{iZ}^r} = \frac{10 \cdot 0,003656 \cdot 100000}{15792,89} = 0,23 \quad [gS \cdot MJ^{-1}] \quad (32)$$

Jednotlivé části síry obsažené v palivu:

Veškerá síra v palivu - průměrně $S^r = 0,003656$ [-]

Síra síranová - odhad $S_{SO4} = 0,09$ [%]

Síra prchavá:

$$S_{pr} = \frac{S_t^r}{2} = \frac{0,003656}{2} = 0,00183 \quad [-] \quad (33)$$

Součet síry pyritická S_p a síra organická S_o :

$$S_{op} = S_t^r - \frac{S_{SO4}}{1000} = 0,003656 - \frac{0,09}{1000} = 0,003566 \quad [-] \quad (34)$$

Výhřevnost směsi podle ON 070417:

$$Q_{iON}^r = [338 \cdot C_t^r + 978 \cdot H_t^r - 103 \cdot (O_t^r - S_{op}) - 24,5 \cdot W_t^r] \cdot 100 \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (35)$$

$$Q_{iON}^r = [338 \cdot 0,407 + 978 \cdot 0,054 - 103 \cdot (0,295373 - 0,003566) - 24,5 \cdot 0,1825] \cdot 100 = 15633,682 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevnost směsi:

$$Q_i^r = \frac{Q_{iZ}^r + Q_{iON}^r}{2} = \frac{15792,89 + 15633,682}{2} = 15713,288 \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (36)$$

Rekapitulace poměrných hmotnostních podílů složení konečného paliva:

Hmotnostní podíl vody v surovém palivu $W_t^r = 0,154$ [-]

Hmotnostní podíl popele v surovém palivu $A_t^r = 0,05$ [-]

Hmotnostní podíl hořlaviny v surovém palivu (zanedbán chlor a fluor):

$$h^r = C_t^r + H_t^r + S_t^r + O_t^r + N_t^r \quad [-] \quad (37)$$

$$h^r = 0,407 + 0,054 + 0,00183 + 0,295373 + 0,035884 = 0,794 \quad [-]$$

Součet hmotnostních podílů:

$$\Sigma = h^r + W_t^r + A_t^r \quad [-] \quad (38)$$

$$\Sigma = 0,794 + 0,154 + 0,05 = 0,998 \quad [-]$$

4.3 Výkon kotle

| | | |
|--|------------------|----------------------|
| Jmenovitý absolutní tlak syté páry | $p = 1,3$ | $[MPa(a)]$ |
| Jmenovitá teplota napájecí vody | $t_{nv} = 105$ | $[^{\circ}C]$ |
| Entalpie syté páry pro $p = 1,3 \text{ MPa}(a)$ | $i_p = 2786,5$ | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ |
| Entalpie napájecí vody pro $p = 1,3 \text{ MPa}(a); t_{nv} = 105^{\circ}C$ | $i_{nv} = 441,1$ | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ |
| Součinitel přebytku vzduchu | $\alpha = 1,6$ | $[-]$ |
| Účinnost kotle | $\eta = 0,86$ | $[-]$ |
| Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích - viz [15] | $z_C = 3$ | $[\%]$ |
| Jmenovitý parní výkon - hodinově | $M_{pH} = 18000$ | $[kg \cdot h^{-1}]$ |
| Jmenovitý parní výkon - sekundově | $M_p = 5$ | $[kg \cdot s^{-1}]$ |
| Normální barometrický tlak | $p_n = 101,325$ | $[kPa]$ |
| Obvyklý barometrický tlak | $p_b = 98,66$ | $[kPa]$ |

Jmenovitý tepelný výkon kotle:

$$Q_V = M_p \cdot (i_p - i_{nv}) = 5 \cdot (2786,5 - 441,1) = 11727 \quad [kW] \quad (39)$$

Tepelný příkon kotle:

$$P = \frac{Q_V}{\eta} = \frac{11727}{0,86} = 13636,05 \quad [kW] \quad (40)$$

Hmotnostní tok paliva:

$$M_{pal} = \frac{P}{Q_i^r} = \frac{13636,05}{15713,288} = 0,868 \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (41)$$

Hmotnostní tok paliva - hodinově:

$$M_{palH} = M_{pal} \cdot 3600 = 0,868 \cdot 3600 = 3124,09 \quad [kg \cdot h^{-1}] \quad (42)$$

Hmotnostní tok paliva skutečně spáleného (výpočtové):

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot \left(1 - \frac{z_C}{100}\right) = 0,868 \cdot \left(1 - \frac{3}{100}\right) = 0,842 \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (43)$$

4.4 Stechiometrie

4.4.1 Stechiometrie vzduchu

Pro výpočet zanedbáváme chlor a fluor.

Minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C_t^r}{12,01} + \frac{H_t^r}{4,032} + \frac{S_{pr}}{32,06} - \frac{O_t^r}{32} \right) \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (44)$$

$$O_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,407}{12,01} + \frac{0,054}{4,032} + \frac{0,00183}{32,06} - \frac{0,295373}{32} \right) = 0,852 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální množství suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZmin}^S = \frac{100}{20,9} \cdot O_{O_2min} = \frac{100}{20,9} \cdot 0,852 = 4,076 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (45)$$

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| $t[^\circ C]$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| $\frac{p''}{p_C - \varphi \cdot p''}$ | 0,006 | 0,012 | 0,024 | 0,044 | 0,08 | 0,141 | 0,25 |

Tab. 4.1 Závislost absolutního tlaku na teplotě vzduchu

Kde:

- φ - relativní vlhkost vzduchu
- p'' - absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu
- p_C - celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu

Pokud vezmeme jako teplotu vzduchu $t_{VZ} = 25^\circ C$ a relativní vlhkost $\varphi = 0,7$, můžeme pomocí Tab. (4.1) a vztahu (46) určit součinitel f . Hodnotu z Tab. (4.1) pro $25^\circ C$ získáme interpolací.

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_C - \varphi \cdot p''} = 1 + 0,7 \cdot 0,034 = 1,024 \quad [-] \quad (46)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZmin} = f \cdot O_{VZmin}^S = 1,024 \cdot 4,076 = 4,174 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (47)$$

4.4.2 Stechiometrie spalín

Objem CO_2 ve spalínách:

$$O_{CO_2} = \left(22,26 \cdot \frac{C_t^r}{12,01} \right) + 0,0003 \cdot O_{VZmin}^S \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (48)$$

$$O_{CO_2} = \left(22,26 \cdot \frac{0,407}{12,01} \right) + 0,0003 \cdot 4,076 = 0,756 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem SO_2 ve spalínách:

$$O_{SO_2} = 21,89 \cdot \frac{S_{pr}}{32,06} = 21,89 \cdot \frac{0,00183}{32,06} = 0,00125 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (49)$$

Objem dusíku N_2 ve spalínách:

$$O_{N_2} = \left(22,4 \cdot \frac{N_t^r}{28,016} \right) + 0,7805 \cdot O_{VZ_{min}}^S \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (50)$$

$$O_{N_2} = \left(22,4 \cdot \frac{0,035884}{28,016} \right) + 0,7805 \cdot 4,076 = 3,21 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem argonu Ar ve spalínách:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZ_{min}}^S = 0,0092 \cdot 4,076 = 0,038 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (51)$$

Minimální množství suchých spalín ze spálení 1 kg paliva:

$$O_{SP_{min}}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (52)$$

$$O_{SP_{min}}^S = 0,756 + 0,00125 + 3,21 + 0,038 = 4,006 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální objem vodní páry ve spalínách:

$$O_{H_2O_{min}} = 44,8 \cdot \frac{H_t^r}{4,032} + 22,4 \cdot \frac{W_t^r}{18,06} + (f - 1) \cdot O_{VZ_{min}}^S \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (53)$$

$$O_{H_2O_{min}} = 44,8 \cdot \frac{0,054}{4,032} + 22,4 \cdot \frac{0,154}{18,06} + (1,024 - 1) \cdot 4,076 = 0,884 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální množství vlhkých spalín ze spálení 1 kg paliva:

$$O_{SP_{min}} = O_{SP_{min}}^S + O_{H_2O_{min}} = 4,006 + 0,884 = 4,89 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (54)$$

Maximální množství CO_2 ve spalínách:

$$CO_{2_{max}} = \frac{O_{CO_2} \cdot 100}{O_{SP_{min}}^S} = \frac{0,756 \cdot 100}{4,006} = 18,885 \quad [\%] \quad (55)$$

Přebytku vzduchu $\alpha = 1,6$ odpovídá objemový podíl kyslíku ve spalínách $\omega_{O_2} = 8,1 \%$.

Součinitel přebytku vzduchu pomocí objemového podílu kyslíku ve spalínách:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \omega_{O_2}} \cdot \frac{O_{SP_{min}}^S}{O_{VZ_{min}}^S} = \frac{21}{21 - 8,1} \cdot \frac{4,006}{4,076} = 1,6 \quad [-] \quad (56)$$

Skutečný objem vodní páry ve spalínách:

$$O_{H_2O} = O_{H_2O_{min}} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZ_{min}}^S \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (57)$$

$$O_{H_2O} = 0,884 + (1,024 - 1) \cdot (1,6 - 1) \cdot 4,076 = 0,943 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Skutečné množství spalin ze spálení 1 kg paliva (při 0 °C; 101325 Pa):

$$O_{SP} = O_{SP_{min}} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ_{min}} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (58)$$

$$O_{SP} = 4,89 + (1,6 - 1) \cdot 4,174 = 7,393 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Skutečné množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva (při 0 °C; 101325 Pa):

$$O_{VZ} = \alpha \cdot O_{VZ_{min}} = 1,6 \cdot 4,174 = 6,677 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (59)$$

Objemové části tříatomových plynů - při celkovém tlaku 0,1 MPa, parciální tlaky tříatomových plynů::

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0,00125 + 0,756}{7,393} = 0,102 \quad [-] \quad (60)$$

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0,756}{7,393} = 0,102 \quad [-] \quad (61)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0,943}{7,393} = 0,128 \quad [-] \quad (62)$$

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,102 + 0,128 = 0,23 \quad [-] \quad (63)$$

Procento popelu v úletu $X_p = 35 \%$ je určeno pro přesuvné rošty pomocí [15].

Koncentrace popílku ve spalinách:

$$\mu = \frac{10 \cdot A_r \cdot 100}{O_{SP}} \cdot \frac{X_p}{100} \quad [g \cdot m^{-3}] \quad (64)$$

$$\mu = \frac{10 \cdot 0,05 \cdot 100}{7,393} \cdot \frac{35}{100} = 2,356 \quad [g \cdot m^{-3}]$$

Potřeba spalovacího vzduchu při jmenovitém výkonu kotle (0 °C; 101,325 kPa):

$$V_{VZN} = M_{pv} \cdot O_{VZ} = 0,842 \cdot 6,677 = 5,621 \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (65)$$

Potřeba spalovacího vzduchu při jmenovitém výkonu kotle (25 °C; 98,66 kPa):

$$V_{VZ} = V_{VZN} \cdot \frac{273,15 + t_{VZ}}{273,15} \cdot \frac{p_n}{p_b} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (66)$$

$$V_{VZ} = 5,621 \cdot \frac{273,15 + 25}{273,15} \cdot \frac{101,325}{98,66} = 6,301 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Potřeba spalovacího vzduchu při jmenovitém výkonu kotle ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $98,66\text{ kPa}$) s rezervou pro různé druhy paliv:

$$V_{VZS} = 1,2 \cdot V_{VZ} = 1,2 \cdot 6,301 = 7,561 \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (67)$$

Hodinově:

$$V_{VZSH} = 3600 \cdot V_{VZS} = 3600 \cdot 7,561 = 27219,099 \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (68)$$

Objemový tok spalin při jmenovitém výkonu kotle ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $101,325\text{ kPa}$):

$$V_{SPN1} = M_{pv} \cdot O_{SP} = 0,842 \cdot 7,393 = 6,223 \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (69)$$

Hodinově:

$$V_{SPN1H} = 3600 \cdot V_{SPN1} = 3600 \cdot 6,223 = 22402,31 \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (70)$$

Objemový tok spalin při jmenovitém výkonu kotle ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $101,325\text{ kPa}$) s rezervou pro různé druhy paliv:

$$V_{SPN} = 1,2 \cdot M_{pv} \cdot O_{SP} = 1,2 \cdot 0,842 \cdot 7,393 = 7,467 \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (71)$$

Objemový tok spalin při jmenovitém výkonu kotle ($\theta_K = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_K = 1,55\text{ kPa}$):

$$V_{SPK} = V_{SPN} \cdot \frac{273,15 + \theta_K}{273,15} \cdot \frac{p_n}{p_b - p_K} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (72)$$

$$V_{SPK} = 7,467 \cdot \frac{273,15 + 180}{273,15} \cdot \frac{101,325}{98,66 - 1,55} = 12,926 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Kde:

$\theta_K = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ - teplota spalin za kotlem
 $p_K = 1,55\text{ kPa}$ - podtlak (tah) za kotlem - určený měřením

Objemový tok spalin při jmenovitém výkonu kotle ($\theta_K = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_K = 1,55\text{ kPa}$) s rezervou pro různá paliva:

$$V_{SPKS} = 1,2 \cdot V_{SPK} = 1,2 \cdot 12,926 = 15,511 \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (73)$$

4.5 Entalpie vzduchu a spalin

Obsah vody d na 1 kg suchého vzduchu se vypočítá pomocí vzorce (74), kde hodnotu koeficientu f dosadíme z již dříve vypočteného vztahu (46). Hodnoty pro vodu a vzduch najdeme v Tab. (4.2).

| CO_2 | SO_2 | O_2 | vzduch | N_2 | Ar | H_2O | H_2 | CO | CH_4 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|------|--------|
| 1,9768 | 2,9262 | 1,4289 | 1,293 | 1,2505 | 1,7839 | 0,804 | 0,08987 | 1,25 | 0,716 |

Tab. 4.2 Hustota plynných složek spalin a vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$]

Obsah vody ve vzduchu - vztaženo na 1 kg suchého vzduchu:

$$d = (f - 1) \cdot \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{VZ}} \cdot 10^3 \quad [g \cdot kg^{-1}] \quad (74)$$

$$d = (1,024 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 14,92343 \quad [g \cdot kg^{-1}]$$

| $t [^{\circ}C]$ | $c_{ps} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$ | $c_{H_2O} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$ |
|-----------------|---|---|
| 0 | 1,297 | 1,494 |
| 30 | 1,298 | 1,4973 |
| 100 | 1,3 | 1,505 |
| 200 | 1,307 | 1,522 |
| 300 | 1,317 | 1,542 |
| 400 | 1,329 | 1,565 |
| 500 | 1,343 | 1,59 |
| 600 | 1,356 | 1,615 |
| 700 | 1,371 | 1,641 |
| 800 | 1,384 | 1,688 |
| 900 | 1,398 | 1,696 |
| 1000 | 1,41 | 1,723 |
| 1200 | 1,43 | 1,775 |
| 1400 | 1,453 | 1,827 |
| 1600 | 1,471 | 1,875 |
| 2000 | 1,5 | 1,963 |
| 2200 | 1,513 | 2,012 |
| 2500 | 1,53 | 2,053 |

Tab. 4.3 Závislost měrné tepelné kapacity suchého vzduchu c_{ps} a vodní páry c_{H_2O} na teplotě

Měrná tepelná kapacita vzduchu a složek spalin je vztažena na 1 m^3 při teplotě $0^{\circ}C$ a tlaku $101,325 kPa$. Měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu je vypočtena pomocí vzorce (75) a výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab. (4.4)

$$c = c_{ps} + 0,0016 \cdot d \cdot c_{H_2O} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}] \quad (75)$$

| | | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| $t [^{\circ}C]$ | 0 | 30 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| c | 1,3327 | 1,3338 | 1,336 | 1,3433 | 1,3538 | 1,36637 | 1,38097 | 1,39456 |

| | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| $t [^{\circ}C]$ | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
| c | 1,41018 | 1,42431 | 1,4385 | 1,45114 | 1,47538 | 1,49662 | 1,51577 |

| | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|
| $t [^{\circ}C]$ | 2000 | 2200 | 2500 |
| c | 1,54687 | 1,56104 | 1,57902 |

Tab. 4.4 Závislost měrné tepelné kapacity vlhkého vzduchu na teplotě

4.5.1 Entalpie vzduchu

Entalpie minimálního množství vzduchu ($\alpha = 1$) se stanoví pomocí rovnice (76), výsledky jsou uvedeny v Tab. (4.5)

$$I_{VZ_{min}} = O_{VZ_{min}} \cdot c \cdot t_{VZ} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (76)$$

| | | | | | | | | |
|-----------------|---|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $t [^{\circ}C]$ | 0 | 30 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| $I_{VZ_{min}}$ | 0 | 167,012 | 557,62 | 1121,42 | 1695,25 | 2281,29 | 2882,07 | 3492,54 |

| | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $t [^{\circ}C]$ | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
| $I_{VZ_{min}}$ | 4120,27 | 4756,04 | 5403,86 | 6057,06 | 7389,89 | 8745,67 | 10122,9 |

| | | | |
|-----------------|---------|----------|----------|
| $t [^{\circ}C]$ | 2000 | 2200 | 2500 |
| $I_{VZ_{min}}$ | 12913,3 | 14334,73 | 16477,08 |

Tab. 4.5 Entalpie minimálního množství vzduchu

4.5.2 Entalpie spalin

| t | i_{CO_2} | i_{SO_2} | i_{N_2} | i_{H_2O} | i_{Ar} |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $[^{\circ}C]$ | $[kJ \cdot m^{-3}]$ | $[kJ \cdot m^{-3}]$ | $[kJ \cdot m^{-3}]$ | $[kJ \cdot m^{-3}]$ | $[kJ \cdot m^{-3}]$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 51 | 56,7 | 38,85 | 45,18 | 29,9 |
| 100 | 170 | 189 | 129,5 | 150,6 | 93 |
| 200 | 357,3 | 392 | 259,9 | 304,5 | 186 |
| 300 | 558,8 | 610 | 392,1 | 462,8 | 278 |
| 400 | 771,9 | 836 | 526,7 | 625,9 | 372 |
| 500 | 994,6 | 1070 | 664 | 794,5 | 465 |
| 600 | 1225,1 | 1310 | 804,3 | 968,8 | 557 |
| 700 | 1462,3 | 1550 | 947,3 | 1148,9 | 650 |
| 800 | 1704,9 | 1800 | 1093,1 | 1334,7 | 743 |
| 900 | 1952,1 | 2050 | 1241,3 | 1526,2 | 834 |
| 1000 | 2203,4 | 2305 | 1391,6 | 1723,1 | 928 |
| 1200 | 2715,8 | 2819 | 1697,7 | 2132,1 | 1112,8 |
| 1400 | 3238,7 | 3333 | 2009,1 | 2559,3 | 1297,6 |
| 1600 | 3769,4 | 3850 | 2324,6 | 3002,1 | 1483 |
| 2000 | 4844,6 | 4890 | 2965,1 | 3925,5 | 1855 |
| 2200 | 5385,8 | 5414 | 3286,7 | 4402,4 | 2041 |
| 2500 | 6204 | 6200 | 3778,1 | 5131,9 | 2320 |

Tab. 4.6 Měrná entalpie složek spalin v závislosti na teplotě

$$I_{SP_{min}} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (77)$$

| $t [^{\circ}C]$ | 0 | 30 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|-----------------|---|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|
| $I_{SP_{min}}$ | 0 | 204,41 | 681,12 | 1381,13 | 2101,54 | 2842,74 | 3604,7 | 4387,2 |

| $t [^{\circ}C]$ | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $I_{SP_{min}}$ | 5188,6 | 6008,11 | 6843,78 | 7694,17 | 9433,35 | 11213,6 | 13026,7 |

| $t [^{\circ}C]$ | 2000 | 2200 | 2500 |
|-----------------|---------|-------|---------|
| $I_{SP_{min}}$ | 16727,2 | 18598 | 21450,4 |

Tab. 4.7 Entalpie minimálního množství spalin

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva při přebytku vzduchu $\alpha = 1,6$ se určí podle vztahu (78). Entalpie popílku se v tomto případě neuvažuje $I_p = 0$.

$$I_{SP} = I_{SP_{min}} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ_{min}} + I_p \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (78)$$

| $t \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ | $I_{SP} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$ | | |
|--------------------------------|---|----------------|----------------|
| | $\alpha = 1,5$ | $\alpha = 1,6$ | $\alpha = 1,7$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 278,917 | 304,618 | 321,319 |
| 100 | 959,925 | 1015,687 | 1071,449 |
| 200 | 1941,845 | 2053,987 | 2166,129 |
| 300 | 2949,162 | 3118,687 | 3288,212 |
| 400 | 3983,384 | 4211,513 | 4439,642 |
| 500 | 5045,74 | 5333,948 | 5622,155 |
| 600 | 6133,472 | 6482,726 | 6831,98 |
| 700 | 7248,733 | 7660,76 | 8072,788 |
| 800 | 8386,134 | 8861,738 | 9337,342 |
| 900 | 9545,703 | 10086,09 | 10626,47 |
| 1000 | 10722,7 | 11328,41 | 11934,12 |
| 1200 | 13128,3 | 13867,29 | 14606,28 |
| 1400 | 15586,4 | 16460,97 | 17335,54 |
| 1600 | 18088,12 | 19100,41 | 20112,7 |
| 2000 | 23183,87 | 24475,2 | 25766,53 |
| 2200 | 25765,38 | 27198,86 | 28632,33 |
| 2500 | 29688,97 | 31336,68 | 32984,39 |

Tab. 4.8 Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva

Tab. (4.8) byla sestrojena pro přebytky vzduchu α (1,5; 1,6; 1,7). Podstatné jsou hodnoty pro přebytek $\alpha = 1,6$, který vyplynul ze zadání. Ostatní hodnoty jsou pomocné a při konstrukci křivek v grafu slouží pro lepší představu ovlivnění entalpie přebytkem vzduchu.

4.5.3 I - t diagram

Výsledky výpočtů z Tab. (4.8) jsou zaneseny do diagramu $I = f(t)$ pro všechny přebytky vzduchu včetně minimálních hodnot. Tyto výsledky pak slouží při výpočtu jednotlivých výhřevných ploch. Samotný I - t diagram je přiložen v Příloze A.

5 Žárotrubná část kotle - 1. tah žárových trubek

| | | |
|---|--------------------|---------------|
| Teplota spalin na vstupu do 1. tahu | $\theta_0 = 790$ | $[^{\circ}C]$ |
| Teplota spalin na výstupu z 1. tahu | $\theta_2 = 348$ | $[^{\circ}C]$ |
| Tlak (tah) spalin v 1. tahu žárových trubek - střední | $p_l = 0,85$ | $[kPa]$ |
| Jmenovitý absolutní tlak syté páry | $p = 1,3$ | $[MPa(a)]$ |
| Teplota syté páry | $t_{SAT} = 191,61$ | $[^{\circ}C]$ |

Střední teplota spalin v 1. tahu žárových trubek:

$$\theta_{S|} = \frac{\theta_0 + \theta_2}{2} = \frac{790 + 348}{2} = 569 \quad [^{\circ}C] \quad (79)$$

$$T_l = 273,15 + \theta_{S|} = 273,15 + 569 = 842,15 \quad [K]$$

Objemový tok spalin v 1. tahu žárových trubek při střední teplotě $\theta_{S|} = 569 \text{ }^{\circ}C$

$$O_{SP|} = V_{SPN} \cdot \frac{273,15 + \theta_{S|}}{273,15} \cdot \frac{p_n}{p_b + p_l} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (80)$$

$$O_{SP|} = 7,467 \cdot \frac{273,15 + 569}{273,15} \cdot \frac{101,325}{98,66 + 0,85} = 23,443 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

5.1 Geometrie 1. tahu žárových trubek

| | | |
|-----------------------|-----------------|--------|
| Počet trubek | $i = 310$ | $[ks]$ |
| Vnější průměr trubek | $d_0 = 76,1$ | $[mm]$ |
| Tloušťka stěny trubek | $s_{l0} = 3,2$ | $[mm]$ |
| Délka žárových trubek | $L_{l0} = 5,15$ | $[m]$ |

Vnitřní průměr žárových trubek:

$$d_{l0} = \frac{d_0 - 2 \cdot s_{l0}}{1000} = \frac{76,1 - 2 \cdot 3,2}{1000} = 0,0697 \quad [m] \quad (81)$$

Průtočný průřez spalin v 1. tahu žárových trubek:

$$S_l = i \cdot \frac{\pi \cdot d_{l0}^2}{4} \quad [m^2] \quad (82)$$

$$S_l = 310 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0697^2}{4} = 1,183 \quad [m^2]$$

Výhřevná plocha 1. tahu žárových trubek:

$$F_l = i \cdot \pi \cdot d_{l0} \cdot L_{l0} \quad [m^2] \quad (83)$$

$$F_{\parallel} = 310 \cdot \pi \cdot 0,0697 \cdot 5,15 = 349,584 \quad [m^2]$$

Střední rychlost spalin v 1. t. žár. tr. (při střední teplotě spalin $\theta_{S\parallel} = 569 \text{ } ^\circ C$):

$$w_{S\parallel} = \frac{O_{SP\parallel}}{S_{\parallel}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (84)$$

$$w_{S\parallel} = \frac{23,443}{1,183} = 19,82 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Teplotní rozdíly:

$$\Delta t_V = \theta_0 - t_{SAT} = 790 - 191,61 = 598,39 \quad [^\circ C] \quad (85)$$

$$\Delta t_M = \theta_2 - t_{SAT} = 348 - 191,61 = 156,39 \quad [^\circ C] \quad (86)$$

$$\frac{\Delta t_V}{\Delta t_M} = \frac{598,39}{156,39} = 3,826 > 1,7 \quad (87)$$

Teplotní spád v 1. tahu žárových trubek:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}\right)} \quad [^\circ C] \quad (88)$$

$$\Delta t = \frac{598,39 - 156,39}{2,3 \cdot \log\left(\frac{598,39}{156,39}\right)} = 329,76 \quad [^\circ C]$$

5.1.1 Sdílení tepla v 1. tahu žárových trubek

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| t | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 |
| $\lambda \cdot 10^{-2}$ | 2,28 | 3,19 | 4,01 | 4,84 | 5,7 | 6,56 | 7,42 | 8,27 | 9,15 | 10,0 | 10,9 | 11,8 |

Tab. 5.1 Součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě spalin [7]

Kde:

t $[^\circ C]$ - teplota spalin
 $\lambda \cdot 10^{-2}$ $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ - součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě spalin

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| t | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 |
| $\nu \cdot 10^{-6}$ | 11,9 | 20,8 | 31,6 | 43,9 | 57,8 | 73,0 | 89,4 | 107 | 126 | 146 | 167 | 188 |

Tab. 5.2 Kinematická viskozita při střední teplotě spalin [7]

Kde:

t $[^\circ C]$ - teplota spalin
 $\nu \cdot 10^{-6}$ $[m \cdot s^{-1}]$ - kinematická viskozita při střední teplotě spalin

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t [^{\circ}C]$ | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 |
| Pr | 0,74 | 0,70 | 0,67 | 0,65 | 0,64 | 0,62 | 0,61 | 0,60 | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 0,57 |

Tab. 5.3 Prandtlovo číslo při střední teplotě spalín [7]

Součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě $\theta_{S|} = 569 \text{ }^{\circ}C$; viz Tab. (5.1):

$$\lambda_{str} = \left[\left(\frac{\lambda_{600} - \lambda_{500}}{100} \right) \cdot (\theta_{S|} - 500) \right] + \lambda_{500} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (89)$$

$$\lambda_{str} = \left[\left(\frac{0,0742 - 0,0656}{100} \right) \cdot (569 - 500) \right] + 0,0656 = 0,072 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{\lambda} = 1,008 \quad [-]$$

$$\lambda = \lambda_{str} \cdot M_{\lambda} = 0,072 \cdot 1,008 = 0,072 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (90)$$

Kinematická viskozita při střední teplotě spalín $\theta_{S|} = 569 \text{ }^{\circ}C$; viz Tab. (5.2):

$$\nu_{str} = \left[\left(\frac{\nu_{600} - \nu_{500}}{100} \right) \cdot (\theta_{S|} - 500) \right] + \nu_{500} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (91)$$

$$\nu_{str} = \left[\left(\frac{89,4 - 73,0}{100} \right) \cdot (569 - 500) \right] + 73,0 = 8,4316 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{\nu} = 1,01 \quad [-]$$

$$\nu = \nu_{str} \cdot M_{\nu} = 8,4316 \cdot 10^{-5} \cdot 1,01 = 8,5 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (92)$$

Prandtlovo číslo při střední teplotě spalín $\theta_{S|} = 569 \text{ }^{\circ}C$; viz Tab. (5.3):

$$Pr_{str} = Pr_{500} - \left[\left(\frac{Pr_{500} - Pr_{600}}{100} \right) \cdot (\theta_{S|} - 500) \right] \quad [-] \quad (93)$$

$$Pr_{str} = 0,62 - \left[\left(\frac{0,62 - 0,61}{100} \right) \cdot (569 - 500) \right] = 0,6131 \quad [-]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{Pr} = 1,009 \quad [-]$$

$$Pr = Pr_{str} \cdot M_{Pr} = 0,6131 \cdot 1,009 = 0,619 \quad [-] \quad (94)$$

| | | |
|--|---------------------------|---------------|
| Stupeň černosti povrchu stěn | $a_{st} = 0,8$ | $[-]$ |
| Oprava na teplotu proudu spalin a stěny - pro ochl. spalin | $c_t = 1$ | $[-]$ |
| Oprava v prstencových potrubích | $c_m = 1$ | $[-]$ |
| Oprava na poměrnou délku - viz rovnice (95) | $c_{L } = 1$ | $[-]$ |
| Absolutní střední teplota spalin v 1. tahu žárových trubek | $T_{00} = T_{ } = 842,15$ | $[K]$ |
| Absolutní teplota pro spalování dřevní hmoty | $\Delta t_{N } = 60$ | $[^{\circ}C]$ |
| Součinitel využití | $\zeta_{ } = 1$ | $[-]$ |
| Součinitel tepelné efektivity při spalování dřeva | $\psi_{ } = 0,72$ | $[-]$ |

$$c_{L|} = \frac{L_{|0}}{d_{|0}} = \frac{5,15}{0,0697} = 73,888 > 50 \Rightarrow c_{L|} = 1 \quad [-] \quad (95)$$

5.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekci

$$\alpha_K = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_{|0}} \cdot \left(\frac{w_{S|} \cdot d_{|0}}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_{L|} \cdot c_t \cdot c_m \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (96)$$

$$\alpha_K = 0,023 \cdot \frac{0,072}{0,0697} \cdot \left(\frac{19,82 \cdot 0,0697}{8,5 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,619^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 45,83 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Střední efektivní tloušťka sálavé vrstvy:

$$s_{|} = 0,9 \cdot d_{|0} = 0,9 \cdot 0,0697 = 0,063 \quad [m] \quad (97)$$

Tlak v 1. tahu žárových trubek:

$$p_{|1} = \frac{p_n + p_{|}}{10^6} = \frac{101325 \cdot 850}{10^6} = 0,102 \quad [MPa] \quad (98)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů:

$$p_{SP|} = p_{|1} \cdot r_{SP} = 0,102 \cdot 0,23 = 0,024 \quad [MPa] \quad (99)$$

$$\omega_{c|} = r_{SP} = 0,23; \quad p_{c|} = p_{SP|} = 0,024; \quad \omega_{H_2O|} = r_{H_2O} = 0,128$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a parami viz [12]:

$$A_{|} = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{H_2O|}}{\sqrt{p_{c|} \cdot s_{|}}} \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{00}}{1000} \right) \cdot \omega_{c|} \quad [m^{-1} \cdot MPa^{-1}] \quad (100)$$

$$A_{|} = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,128}{\sqrt{0,024 \cdot 0,063}} \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{842,15}{1000} \right) \cdot 0,23 = 12,957 \quad [m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$$

Celková optická sálavá tloušťka proudu spalin:

$$B_{|} = A_{|} \cdot p_{|1} \cdot s_{|} = 12,957 \cdot 0,102 \cdot 0,063 = 0,083 \quad [-] \quad (101)$$

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_{|} = 842,15 \text{ K}$:

$$a_{sn|} = 1 - e^{-B_{|}} = 1 - e^{-0,083} = 0,08 \quad [-] \quad (102)$$

Absolutní teplota zanešeného povrchu trubky (nánosů na trubkách) v 1. tahu žár. trubek:

$$T_{ZA|} = 273,15 + t_{SAT} + \Delta t_{N|} = 273,15 + 191,61 + 60 = 524,76 \quad [K] \quad (103)$$

5.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním v 1. tahu žárových trubek

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{sn|} \cdot T_{|}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_{ZA|}}{T_{|}}\right)^4}{1 - \frac{T_{ZA|}}{T_{|}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (104)$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,08 \cdot 842,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{524,76}{842,15}\right)^4}{1 - \frac{524,15}{842,15}} = 5,502 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Součinitel přestupu tepla ze spalín do stěny v 1. tahu žárových trubek:

$$\alpha_1 = \zeta \cdot (\alpha_K + \alpha_S) = 1 \cdot (45,83 + 5,502) = 51,33 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (105)$$

Součinitel prostupu tepla v 1. tahu žárových trubek:

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,72 \cdot 51,33 = 36,96 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (106)$$

Energie (teplo) převzatá výhřevnou plochou 1. tahu žár. tr. - vztaženo na 1 kg paliva:

$$Q_K = \frac{k \cdot \Delta t_{|} \cdot F_{|} \cdot 10^{-3}}{M_{pv}} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (107)$$

$$Q_K = \frac{36,96 \cdot 329,76 \cdot 349,58 \cdot 10^{-3}}{0,842} = 5061,037 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výkon předaný v 1. tahu žárových trubek:

$$Q = k \cdot \Delta t_{|} \cdot F_{|} \cdot 10^{-3} \quad [kW] \quad (108)$$

$$Q = 36,96 \cdot 329,76 \cdot 349,58 \cdot 10^{-3} = 4260,23 \quad [kW]$$

Jednotlivé poměrné ztráty kotle (pomocí [15]):

| | | |
|---|------------------|-----|
| Poměrná ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mech. nedopalem) | $\xi_C = 3$ | [%] |
| Poměrná ztráta sdílením tepla do okolí | $\xi_{SO} = 0,8$ | [%] |
| Poměrná ztráta chemickým nedopalem | $\xi_O = 0,5$ | [%] |

Součinitel uchování tepla:

$$\phi_{|} = 1 - \frac{\xi_{SO}}{100} = 1 - \frac{0,8}{100} = 0,992 \quad [-] \quad (109)$$

Entalpie spalín na vstupu do 1. tahu žárových trubek (pro $\theta_0 = 790^\circ C$; $\alpha = 1,6$):

- interpolací hodnot z Tab. (4.8)

$$I_0 = \left[\left(\frac{I_{800} - I_{700}}{100} \right) \cdot (\theta_0 - \theta_{700}) \right] + I_{700} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (110)$$

$$I_0 = \left[\left(\frac{8861,738 - 7660,76}{100} \right) \cdot (790 - 700) \right] + 7660,76 = 8741,64 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Entalpie spalin na výstupu z 1. tahu žárových trubek:

$$I_1 = I_0 - \frac{Q_K}{\phi_1} = 8741,64 - \frac{5061,037}{0,992} = 3639,79 \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (111)$$

Teplota spalin na výstupu z 1. tahu žárových trubek - vypočítaná:

$$\theta_{1S} = \frac{I_1 - I_{300}}{\left(\frac{I_{400} - I_{300}}{100} \right)} + 300 \quad [^{\circ}C] \quad (112)$$

$$\theta_{1S} = \frac{3639,79 - 3118,687}{\left(\frac{4211,513 - 3118,687}{100} \right)} + 300 = 347,7 \quad [^{\circ}C]$$

Rozdíl mezi zadanou $\theta_2 = 348 \text{ } ^{\circ}C$ a vypočtenou $\theta_{1S} = 347,7 \text{ } ^{\circ}C$ teplotou spalin na výstupu z 1. tahu žárových trubek:

$$\Delta\theta = \theta_{1S} - \theta_1 = 347,7 - 348 = -0,3 \quad [^{\circ}C] \quad - \text{vyhovuje} \quad (113)$$

Zatížení výhřevné plochy 1. tahu žárových trubek:

$$q_1 = \frac{Q_1}{F_1} = \frac{4260,23}{349,58} = 12,19 \quad [kW \cdot m^{-2}] \quad (114)$$

5.1.4 Účinnost kotle s ekonomizérem

Entalpie spalin při teplotě spalovacího vzduchu $t_{VZ} = 25 \text{ } ^{\circ}C$ a $\alpha = 1,6$:

- interpolací hodnot z Tab. (4.8)

$$I_{SPv} = \left[\left(\frac{I_{30} - I_0}{30} \right) \cdot (t_{VZ} - 0) \right] + I_0 \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (115)$$

$$I_{SPv} = \left[\left(\frac{304,618 - 0}{30} \right) \cdot (25 - 0) \right] + 0 = 253,85 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Entalpie spalin na výstupu z kotle při teplotě $\theta_K = 180 \text{ } ^{\circ}C$ a $\alpha = 1,6$:

- interpolací hodnot z Tab. (4.8)

$$I_K = \left[\left(\frac{I_{200} - I_{100}}{100} \right) \cdot (\theta_K - \theta_{100}) \right] + I_{100} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (116)$$

$$I_K = \left[\left(\frac{2053,987 - 1015,687}{100} \right) \cdot (180 - 100) \right] + 1015,687 = 1846,33 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Komínová ztráta - bez použití spirál:

- není uvažován předehřev paliva, předehřev spalovacího vzduchu ani recirkulace spalin, proto je počítáno pouze s výhřevností jako s přivedeným teplem do kotle.

$$\xi_K = (100 - \zeta_C) \cdot \frac{I_K - I_{SPv}}{Q_i^r} \quad [\%] \quad (117)$$

$$\xi_K = (100 - 3) \cdot \frac{1846,33 - 253,85}{15713,29} = 9,83 \quad [\%]$$

Účinnost kotle:

$$\eta_K = 100 - (\xi_K + \xi_{SO} + \xi_C + \xi_O) \quad [\%] \quad (118)$$

$$\eta_K = 100 - (9,83 + 0,8 + 3 + 0,5) = 85,9 \quad [\%]$$

6 Ekonomizér kotle

Ekonomizér kotle VSB-18000 je koncipován jako dvoustupňový protiproudý neodpařovací výměník tepla.

6.1 Rozvržení výhřevných ploch

6.1.1 Teploty spalin

Teploty spalin v jednotlivých částech ekonomizéru a jim příslušné hodnoty entalpií spalin. Podrobné rozmístění teplot a tlaků v kotli je patrné z Obr. 6.3

Vstup do 2. stupně Eka:

$$\begin{array}{ll} \text{teplota spalin} & \theta_2 = 348 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \text{entalpie spalin} & I_2 = 3643,243 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \end{array}$$

Výstup z 2. stupně Eka - vstup do 1. stupně:

$$\begin{array}{ll} \text{teplota spalin} & \theta_1 = 267 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \text{entalpie spalin} & I_1 = 2767,336 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \end{array}$$

Výstup z 1. stupně Eka - výstup z Ekonomizéru:

$$\begin{array}{ll} \text{teplota spalin} & \theta_E = 220 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \text{entalpie spalin} & I_E = 2266,927 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \end{array}$$

6.1.2 Bilanční teplo na straně spalin

Bilanční teplo pro celý ekonomizér:

$$Q_{EB} = \phi \cdot (I_2 - I_E) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (119)$$

$$Q_{EB} = 0,992 \cdot (3643,243 - 2266,927) = 963,4212 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Bilanční teplo pro 2. stupeň eka:

$$Q_{2B} = \phi \cdot (I_2 - I_1) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (120)$$

$$Q_{2B} = 0,992 \cdot (3643,243 - 2767,336) = 613,135 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Bilanční teplo pro 1. stupeň eka:

$$Q_{1B} = \phi \cdot (I_1 - I_E) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (121)$$

$$Q_{1B} = 0,992 \cdot (2767,336 - 2266,927) = 350,286 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

6.1.3 Tepelné výkony v ekonomizéru

Tepelný výkon pro celý ekonomizér:

$$Q_E = Q_{EB} \cdot M_{pv} \quad [kW] \quad (122)$$

$$Q_E = 963,4212 \cdot 0,842 = 810,978 \quad [kW]$$

Tepelný výkon pro 2. stupeň Eka:

$$Q_2 = Q_{2B} \cdot M_{pv} \quad [kW] \quad (123)$$

$$Q_2 = 613,135 \cdot 0,842 = 516,118 \quad [kW]$$

Tepelný výkon pro 1. stupeň Eka:

$$Q_1 = Q_{1B} \cdot M_{pv} \quad [kW] \quad (124)$$

$$Q_2 = 350,286 \cdot 0,842 = 294,86 \quad [kW]$$

6.1.4 Teploty napájecí vody v ekonomizéru

Hmotnostní tok napájecí vody:

$$M_{nv} = M_P \cdot [1 + (z_{odl} + z_{odk})] \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (125)$$

$$M_{nv} = 5 \cdot [1 + (0,02 + 0,03)] = 5,25 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

hodinově:

$$M_{nvH} = M_{nv} \cdot 3600 \quad [kg \cdot h^{-1}] \quad (126)$$

$$M_{nvH} = 5,25 \cdot 3600 = 18900 \quad [kg \cdot h^{-1}]$$

Kde:

$z_{odl} = 0,02$ - ztráta odluhem 2 %

$z_{odk} = 0,03$ - ztráta odkalem 3 %

Výstup z 2. stupně Eka - vstup do výparníku kotle:

$$Q_E = M_{nv} \cdot (i_{nv2} - i_{nv}) \quad (127)$$

potom entalpie napájecí vody:

$$i_{nv2} = \frac{Q_E}{M_{nv}} + i_{nv} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (128)$$

$$i_{nv2} = \frac{810,978}{5,25} + 441,1 = 595,572 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Entalpii $i_{nv2} = 595,572 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ a tlaku $p_{nv2} = 1,4 \text{ MPa}(a)$ odpovídá teplota napájecí vody:

Teplota napájecí vody: $t_{nv2} = 141,3 \quad [^{\circ}\text{C}]$

Nedohřev do bodu varu:

$$\Delta\tau = t_{SAT} - t_{nv} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (129)$$

$$\Delta\tau = 191,61 - 141,3 = 50,31 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Výstup z 1. stupně Eka - vstup do 2. stupně Eka:

$$Q_2 = M_{nv} \cdot (i_{nv2} - i_{nv1}) \quad (130)$$

potom entalpie napájecí vody:

$$i_{nv1} = i_{nv2} - \frac{Q_2}{M_{nv}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (131)$$

$$i_{nv1} = 595,572 - \frac{516,118}{5,25} = 497,264 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Entalpii $i_{nv1} = 497,264 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ a tlaku $p_{nv1} = 1,55 \text{ MPa}(a)$ odpovídá teplota napájecí vody:

Teplota napájecí vody: $t_{nv1} = 118,4 \quad [^{\circ}\text{C}]$

6.2 2. Stupeň ekonomizéru

| | | |
|-----------------------|----------------|---------------|
| Počet trubek | $i_2 = 22$ | $[\text{ks}]$ |
| Vnější průměr trubek | $d_2 = 33,7$ | $[\text{mm}]$ |
| Tloušťka stěny trubek | $s_{ 2} = 2,6$ | $[\text{mm}]$ |

Vnitřní průměr trubek:

$$d_{|2} = \frac{d_2 - 2 \cdot s_{|2}}{1000} \quad [\text{m}] \quad (132)$$

$$d_{|2} = \frac{33,7 - 2 \cdot 2,6}{1000} = 0,0285 \quad [\text{m}]$$

Průtočný průřez vody ve 2. stupni Eka:

$$S_{W2} = i_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{|2}^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (133)$$

$$S_{W2} = 22 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0285^2}{4} = 0,014035 \quad [m^2]$$

Střední teplota vody ve 2. stupni Eka:

$$t_{S2} = \frac{t_{nv2} + t_{nv1}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (134)$$

$$t_{S2} = \frac{141,3 + 118,4}{2} = 129,85 \quad [^{\circ}C]$$

Střední tlak vody ve 2. stupni Eka:

$$p_{S2} = \frac{p_{nv2} + p_{nv1}}{2} \quad [MPa(a)] \quad (135)$$

$$p_{S2} = \frac{1,4 + 1,55}{2} = 1,475 \quad [MPa(a)]$$

Měrný objem napájecí vody ve 2. stupni Eka pro $t_{S2} = 129,85^{\circ}C$ a $p_{S2} = 1,475 MPa(a)$:

$$v_{S2} = 0,001069 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (136)$$

Rychlost vody ve 2. stupni Eka:

$$w_{W2} = \frac{M_{nv} \cdot v_{S2}}{S_{W2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (137)$$

$$w_{W2} = \frac{5,25 \cdot 0,001069}{0,014035} = 0,4 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

| | | |
|--|---------------|--------|
| Šířka kanálu v podélném směru trubek | $a = 2,1$ | $[m]$ |
| Hloubka kanálu | $h = 1,14$ | $[m]$ |
| Délka trubek | $l_2 = 2,1$ | $[m]$ |
| Počet trubek v nejužším průřezu s délkou l_2 | $z_{TR2} = 8$ | $[ks]$ |
| Počet trubek ve svazku | $z_2 = 176$ | $[ks]$ |

Průtočný průřez na straně spalin:

$$F_{sp} = a \cdot h - \left(z_{TR2} \cdot \frac{d_2}{1000} \cdot l_2 \right) \quad [m^2] \quad (138)$$

$$F_{sp} = 2,1 \cdot 1,14 - \left(8 \cdot \frac{33,7}{1000} \cdot 2,1 \right) = 1,828 \quad [m^2]$$

Střední teplota spalin ve 2. stupni Eka:

$$\theta_{S2} = \frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (139)$$

$$\theta_{S2} = \frac{348 + 267}{2} = 307,5 \quad [^{\circ}C]$$

Objemový tok spalin ve 2. stupni Eka při střední teplotě spalin $\theta_{S2} = 307,5 \text{ }^{\circ}C$:

$$O_{SP2} = V_{SPN} \cdot \frac{273,15 + \theta_{S2}}{273,15} \cdot \frac{p_n}{p_b - 0,4} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (140)$$

$$O_{SP2} = 7,467 \cdot \frac{273,15 + 307,5}{273,15} \cdot \frac{101,325}{98,66 - 0,4} = 16,369 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Střední rychlost spalin ve 2. stupni Eka při střední teplotě spalin $\theta_{S2} = 307,5 \text{ }^{\circ}C$:

$$w_{S2} = \frac{O_{SP2}}{F_{sp}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (141)$$

$$w_{S2} = \frac{16,369}{1,828} = 8,955 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Rychlost spalin ve 2. stupni Eka vztažená na $0 \text{ }^{\circ}C$; 101325 Pa :

$$w_{N2} = \frac{V_{SPN}}{F_{sp}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (142)$$

$$w_{N2} = \frac{7,467}{1,828} = 4,085 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Výhřevná plocha 2. stupně Eka:

$$F_2 = z_2 \cdot \pi \cdot \frac{d_2}{1000} \cdot l_2 \quad [m^2] \quad (143)$$

$$F_2 = 176 \cdot \pi \cdot \frac{33,7}{1000} \cdot 2,1 = 39,13 \quad [m^2]$$

Teplotní rozdíl:

$$\Delta t_{V2} = \theta_2 - t_{nv2} = 348 - 141,3 = 206,7 \quad [^{\circ}C] \quad (144)$$

$$\Delta t_{M2} = \theta_1 - t_{nv1} = 267 - 118,4 = 148,6 \quad [^{\circ}C] \quad (145)$$

$$\frac{\Delta t_{V2}}{\Delta t_{M2}} = \frac{206,7}{148,6} = 1,391 < 1,7 \quad (146)$$

Teplotní spád ve 2. stupni Eka:

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta t_{V2} - \Delta t_{M2}}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_{V2}}{\Delta t_{M2}}\right)} \quad [^{\circ}C] \quad (147)$$

$$\Delta t_2 = \frac{206,7 - 148,6}{2,3 \cdot \log\left(\frac{206,7}{148,6}\right)} = 176,253 \quad [^{\circ}C]$$

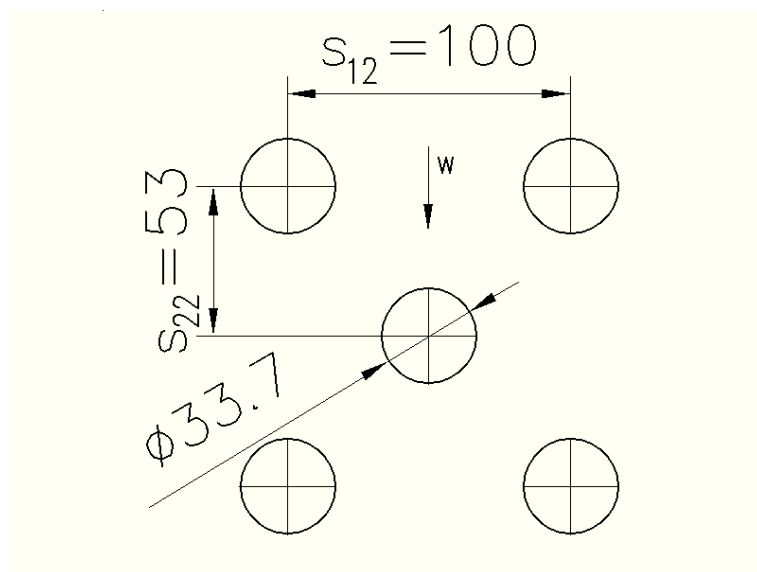
$$\Delta t_2 = \frac{\Delta t_{V2} + \Delta t_{M2}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (148)$$

$$\Delta t_2 = \frac{206,7 + 148,6}{2} = 177,65 \quad [^{\circ}C]$$

Pro křížové proudění s větším počtem tahů než čtyři se oprava na křížový proud neuvažuje.

6.2.1 Sdílení tepla ve 2. stupni Eka

| | | |
|-------------------------------|----------------|--------|
| Příčná rozteč | $s_{12} = 100$ | $[mm]$ |
| Podélná rozteč | $s_{22} = 53$ | $[mm]$ |
| Oprava na počet podélných řad | $c_{z2} = 1$ | $[-]$ |



Obr. 6.1 Rozteče trubek pro 2. stupeň eka - vystřídáný svazek

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_{12} = \frac{s_{12}}{d_2} = \frac{100}{33,7} = 2,967 \quad [-] \quad (149)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_{22} = \frac{s_{22}}{d_2} = \frac{53}{33,7} = 1,573 \quad [-] \quad (150)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč:

$$\sigma_{U2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_{12}^2 + \sigma_{22}^2} \quad [-] \quad (151)$$

$$\sigma_{U2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2,967^2 + 1,573^2} = 2,162 \quad [-]$$

Parametr uspořádání trubek:

$$\phi_{\sigma 2} = \frac{\sigma_{12} - 1}{\sigma_{U2} - 1} \quad [-] \quad (152)$$

$$\phi_{\sigma 2} = \frac{2,967 - 1}{2,162 - 1} = 1,693 \quad [-]$$

$$0,1 < \phi_{\sigma 2} = 1,693 < 1,7 \quad [-] \quad (153)$$

Oprava na poměrné rozteče:

$$c_{S2} = 0,34 \cdot \phi_{\sigma 2}^{0,1} \quad [-] \quad (154)$$

$$c_{S2} = 0,34 \cdot 1,693^{0,1} = 0,358 \quad [-]$$

Součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě $\theta_{S2} = 307,5 \text{ } ^\circ\text{C}$; viz Tab. (5.1):

$$\lambda_{str2} = \left[\left(\frac{\lambda_{400} - \lambda_{300}}{100} \right) \cdot (\theta_{S2} - 300) \right] + \lambda_{300} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (155)$$

$$\lambda_{str2} = \left[\left(\frac{0,057 - 0,0484}{100} \right) \cdot (307,5 - 300) \right] + 0,0484 = 0,049 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{\lambda 2} = 1,005 \quad [-]$$

$$\lambda_2 = \lambda_{str2} \cdot M_{\lambda 2} = 0,049 \cdot 1,005 = 0,049 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (156)$$

Kinematická viskozita při střední teplotě $\theta_{S2} = 307,5 \text{ } ^\circ\text{C}$; viz Tab. (5.2):

$$\nu_{str2} = \left[\left(\frac{\nu_{400} - \nu_{300}}{100} \right) \cdot (\theta_{S2} - 300) \right] + \nu_{300} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (157)$$

$$\nu_{str2} = \left[\left(\frac{57,8 - 43,9}{100} \right) \cdot (307,5 - 300) \right] + 43,9 = 4,4942 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{\nu 2} = 1,03 \quad [-]$$

$$\nu_2 = \nu_{str2} \cdot M_{\nu2} = 4,4942 \cdot 10^{-5} \cdot 1,03 = 4,629 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (158)$$

Prandtlovo číslo při střední teplotě $\theta_{S2} = 307,5 \text{ } ^\circ C$; viz Tab. (5.3):

$$Pr_{str2} = Pr_{300} - \left[\left(\frac{Pr_{300} - Pr_{400}}{100} \right) \cdot (\theta_{S2} - 300) \right] \quad [-] \quad (159)$$

$$Pr_{str2} = 0,65 - \left[\left(\frac{0,65 - 0,64}{100} \right) \cdot (307,5 - 300) \right] = 0,6492 \quad [-]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{Pr2} = 1,009 \quad [-]$$

$$Pr_2 = Pr_{str2} \cdot M_{Pr2} = 0,6492 \cdot 1,009 = 0,655 \quad [-] \quad (160)$$

Souč. přestupu tepla konvekcí pro příčné proudění a vystřídáný svazek 2. st. Eka:

$$\alpha_{K2} = c_{S2} \cdot c_{z2} \cdot \frac{\lambda_2}{\left(\frac{d_2}{1000}\right)} \cdot \left[\frac{w_{S2} \cdot \left(\frac{d_2}{1000}\right)}{\nu_2} \right]^{0,6} \cdot Pr_2^{0,33} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (161)$$

$$\alpha_{K2} = 0,358 \cdot 1 \cdot \frac{0,049}{\left(\frac{33,7}{1000}\right)} \cdot \left[\frac{8,955 \cdot \left(\frac{33,7}{1000}\right)}{4,629 \cdot 10^{-5}} \right]^{0,6} \cdot 0,655^{0,33} = 88,59 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním ve 2. stupni Eka:

nízké teploty spalin - sálání se neuvažuje $\alpha_{S2} = 0 \text{ } [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

Součinitel využití: $\xi = 0,98 \text{ } [-]$

Součinitel přestupu tepla ze spalin do stěny ve 2. stupni Eka:

$$\alpha_2 = \xi \cdot (\alpha_{K2} + \alpha_{S2}) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (162)$$

$$\alpha_2 = 0,98 \cdot (88,59 + 0) = 86,819 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Součinitel zanešení ve 2. stupni Eka:

$$\epsilon_2 = (c_{d2} \cdot c_{f2} \cdot \epsilon_{02}) + \Delta\epsilon \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad (163)$$

$$\epsilon_2 = (0,8 \cdot 1 \cdot 0,0024) + 0 = 0,00192 \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$$

Kde:

| | | |
|--------------------------|------------------------------|---|
| $c_{d2} = 0,8$ | $[-]$ | - opravný koeficient na vnější průměr trubky |
| $c_{f2} = 1$ | $[-]$ | - opravný koeficient na frakci popílkových částecek |
| $\Delta\epsilon = 0$ | $[-]$ | - přídavek |
| $\epsilon_{02} = 0,0024$ | $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$ | - výchozí součinitel zanešení |

Součinitel prostupu tepla ve 2. stupni Eka:

$$k_2 = \frac{\alpha_2}{1 + (\epsilon_2 \cdot \alpha_2)} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (164)$$

$$k_2 = \frac{86,819}{1 + (0,00192 \cdot 86,819)} = 74,414 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Tepelný výkon předaný prostupem stěnou trubek ve 2. stupni Eka:

$$Q_{F2} = \Delta t_2 \cdot F_2 \cdot k_2 \cdot 10^{-3} \quad [kW] \quad (165)$$

$$Q_{F2} = 177,65 \cdot 39,13 \cdot 74,414 \cdot 10^{-3} = 517,29 \quad [kW]$$

Potřebný tepelný výkon pro 2. stupeň Eka - rozdíl:

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_{F2} - Q_2 \quad [kW] \quad (166)$$

$$\Delta Q_2 = 517,29 - 516,118 = 1,171 \quad [kW]$$

$$\frac{\Delta Q_2}{Q_2} \cdot 100 = \frac{1,171}{516,118} \cdot 100 = 0,22696 [\%] < -0,5 [\%] \quad (167)$$

Měrné zatížení výhřevné plochy ve 2. stupni Eka:

$$q_2 = \frac{Q_{F2}}{F_2} \quad [kW \cdot m^{-2}] \quad (168)$$

$$q_2 = \frac{517,29}{39,13} = 13,22 \quad [kW \cdot m^{-2}]$$

6.3 1. Stupeň ekonomizéru

| | | |
|-----------------------|----------------|--------|
| Počet trubek | $i_1 = 18$ | $[ks]$ |
| Vnější průměr trubek | $d_1 = 33,7$ | $[mm]$ |
| Tloušťka stěny trubek | $s_{ 1} = 2,6$ | $[mm]$ |

Vnitřní průměr trubek:

$$d_{|1} = \frac{d_1 - 2 \cdot s_{|1}}{1000} \quad [m] \quad (169)$$

$$d_{|1} = \frac{33,7 - 2 \cdot 2,6}{1000} = 0,0285 \quad [m]$$

Průtočný průřez vody v 1. stupni Eka:

$$S_{W1} = i_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_{|1}^2}{4} \quad [m^2] \quad (170)$$

$$S_{W1} = 18 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0285^2}{4} = 0,011483 \quad [m^2]$$

Střední teplota vody v 1. stupni Eka:

$$t_{S1} = \frac{t_{nv1} + t_{nv}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (171)$$

$$t_{S1} = \frac{118,4 + 105}{2} = 111,7 \quad [^{\circ}C]$$

Střední tlak vody v 1. stupni Eka:

$$p_{S1} = \frac{p_{nv1} + p_{nv}}{2} \quad [MPa(a)] \quad (172)$$

$$p_{S1} = \frac{1,55 + 1,7}{2} = 1,625 \quad [MPa(a)]$$

Měrný objem napájecí vody v 1. stupni Eka pro $t_{S1} = 111,7^{\circ}C$ a $p_{S1} = 1,625 MPa$:

$$v_{S1} = 0,001052 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (173)$$

Rychlost vody v 1. stupni Eka:

$$w_{W1} = \frac{M_{nv} \cdot v_{S1}}{S_{W1}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (174)$$

$$w_{W1} = \frac{5,25 \cdot 0,001052}{0,011483} = 0,481 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

| | | |
|--|---------------|--------|
| Šířka kanálu v podélném směru trubek | $a = 2,1$ | $[m]$ |
| Hloubka kanálu | $h = 1,14$ | $[m]$ |
| Délka trubek | $l_1 = 2,1$ | $[m]$ |
| Počet trubek v nejužším průřezu s délkou l_1 | $z_{TR1} = 8$ | $[ks]$ |
| Počet trubek ve svazku | $z_1 = 144$ | $[ks]$ |

Průtočný průřez na straně spalin:

$$F_{sp1} = a \cdot h - \left(z_{TR1} \cdot \frac{d_1}{1000} \cdot l_1 \right) \quad [m^2] \quad (175)$$

$$F_{sp1} = 2,1 \cdot 1,14 - \left(8 \cdot \frac{33,7}{1000} \cdot 2,1 \right) = 1,828 \quad [m^2]$$

Střední teplota spalin v 1. stupni Eka:

$$\theta_{S1} = \frac{\theta_1 + \theta_E}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (176)$$

$$\theta_{S1} = \frac{267 + 220}{2} = 243,5 \quad [^{\circ}C]$$

Objemový tok spalin v 1. stupni Eka při střední teplotě spalin $\theta_{S1} = 243,5 \text{ } ^{\circ}C$:

$$O_{SP1} = V_{SPN} \cdot \frac{273,15 + \theta_{S1}}{273,15} \cdot \frac{p_n}{p_b - 0,4} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (177)$$

$$O_{SP1} = 7,467 \cdot \frac{273,15 + 243,5}{273,15} \cdot \frac{101,325}{98,66 - 0,4} = 14,565 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Střední rychlost spalin v 1. stupni Eka při střední teplotě spalin $\theta_S = 243,5 \text{ } ^{\circ}C$:

$$w_{S1} = \frac{O_{SP1}}{F_{sp1}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (178)$$

$$w_{S1} = \frac{14,565}{1,828} = 7,968 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Rychlost spalin v 1. stupni Eka vztažená na $0 \text{ } ^{\circ}C$; 101325 Pa :

$$w_{N1} = \frac{V_{SPN}}{F_{sp1}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (179)$$

$$w_{N1} = \frac{7,467}{1,828} = 4,085 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Výhřevná plocha 1. stupně Eka:

$$F_1 = z_1 \cdot \pi \cdot \frac{d_1}{1000} \cdot l_1 \quad [m^2] \quad (180)$$

$$F_1 = 144 \cdot \pi \cdot \frac{33,7}{1000} \cdot 2,1 = 32,016 \quad [m^2]$$

Teplotní rozdíly:

$$\Delta t_{V1} = \theta_1 - t_{nv1} = 267 - 118,4 = 148,6 \quad [^{\circ}C] \quad (181)$$

$$\Delta t_{M1} = \theta_E - t_{nv} = 220 - 105 = 115 \quad [^{\circ}C] \quad (182)$$

$$\frac{\Delta t_{V1}}{\Delta t_{M1}} = \frac{148,6}{115} = 1,292 < 1,7 \quad (183)$$

Teplotní spád v 1. stupni Eka:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t_{V1} - \Delta t_{M1}}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_{V1}}{\Delta t_{M1}}\right)} \quad [^{\circ}C] \quad (184)$$

$$\Delta t_1 = \frac{148,6 - 115}{2,3 \cdot \log\left(\frac{148,6}{115}\right)} = 131,23 \quad [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t_{V1} + \Delta t_{M1}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (185)$$

$$\Delta t_1 = \frac{148,6 + 115}{2} = 131,8 \quad [^{\circ}C]$$

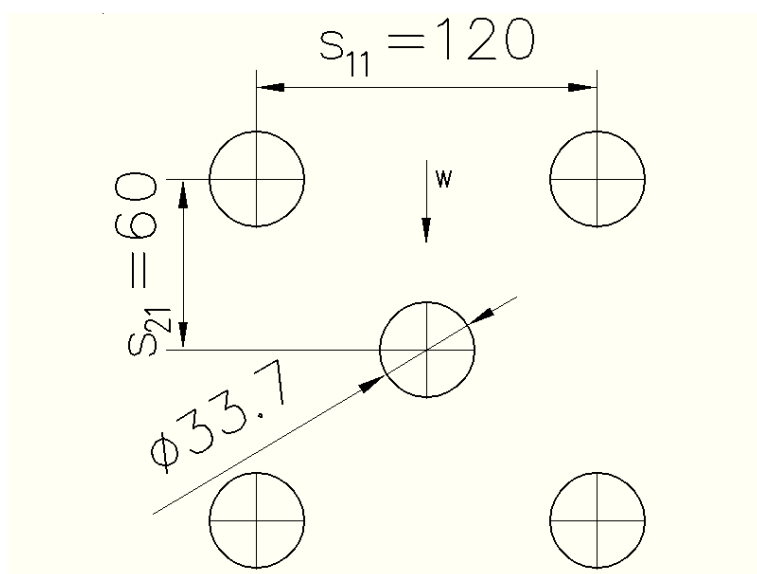
Pro křížové proudění s větším počtem tahů než čtyři se oprava na křížový proud neuvažuje.

6.3.1 Sdílení tepla v 1. stupni Eka

| | | |
|-------------------------------|----------------|--------|
| Příčná rozteč | $s_{11} = 120$ | $[mm]$ |
| Podélná rozteč | $s_{21} = 60$ | $[mm]$ |
| Oprava na počet podélných řad | $c_{z1} = 1$ | $[-]$ |

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_{11} = \frac{s_{11}}{d_1} = \frac{120}{33,7} = 3,561 \quad [-] \quad (186)$$



Obr. 6.2 Rozteče trubek pro 1. stupeň eka - vystřídáný svazek

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_{21} = \frac{s_{21}}{d_1} = \frac{60}{33,7} = 1,78 \quad [-] \quad (187)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč:

$$\sigma_{U1} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_{11}^2 + \sigma_{21}^2} \quad [-] \quad (188)$$

$$\sigma_{U1} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3,561^2 + 1,78^2} = 2,518 \quad [-]$$

Parametr uspořádání trubek:

$$\phi_{\sigma 1} = \frac{\sigma_{11} - 1}{\sigma_{U1} - 1} \quad [-] \quad (189)$$

$$\phi_{\sigma 1} = \frac{3,561 - 1}{2,518 - 1} = 1,687 \quad [-]$$

$$0,1 < \phi_{\sigma 1} = 1,687 < 1,7 \quad [-] \quad (190)$$

Oprava na poměrné rozteče:

$$c_{S1} = 0,34 \cdot \phi_{\sigma 1}^{0,1} \quad [-] \quad (191)$$

$$c_{S1} = 0,34 \cdot 1,687^{0,1} = 0,358 \quad [-]$$

Součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě $\theta_{S1} = 243,5 \text{ } ^\circ\text{C}$; viz Tab. (5.1):

$$\lambda_{str1} = \left[\left(\frac{\lambda_{300} - \lambda_{200}}{100} \right) \cdot (\theta_{S1} - 200) \right] + \lambda_{200} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (192)$$

$$\lambda_{str1} = \left[\left(\frac{0,0484 - 0,0401}{100} \right) \cdot (243,5 - 200) \right] + 0,0401 = 0,0437 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{\lambda1} = 0,998 \quad [-]$$

$$\lambda_1 = \lambda_{str1} \cdot M_{\lambda1} = 0,0437 \cdot 0,998 = 0,044 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (193)$$

Kinematická viskozita při střední teplotě $\theta_{S1} = 243,5 \text{ } ^\circ\text{C}$; viz Tab. (5.2):

$$\nu_{str1} = \left[\left(\frac{\nu_{300} - \nu_{200}}{100} \right) \cdot (\theta_{S1} - 200) \right] + \nu_{200} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (194)$$

$$\nu_{str1} = \left[\left(\frac{43,9 - 31,6}{100} \right) \cdot 10^{-6} \cdot (243,5 - 200) \right] + 31,6 \cdot 10^{-6} = 3,7 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

Opravný koeficient - viz [7]:

$$M_{\nu1} = 0,985 \quad [-]$$

$$\nu_1 = \nu_{str1} \cdot M_{\nu1} = 3,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,985 = 3,64 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (195)$$

Prandtlovo číslo při střední teplotě $\theta_{S1} = 243,5 \text{ } ^\circ\text{C}$; viz Tab. (5.3):

$$Pr_{str1} = Pr_{200} - \left[\left(\frac{Pr_{200} - Pr_{300}}{100} \right) \cdot (\theta_{S1} - 200) \right] \quad [-] \quad (196)$$

$$Pr_{str1} = 0,67 - \left[\left(\frac{0,67 - 0,65}{100} \right) \cdot (243,5 - 200) \right] = 0,6613 \quad [-]$$

Opravný koeficient - :

$$M_{Pr1} = 1,009 \quad [-]$$

$$Pr_1 = Pr_{str1} \cdot M_{Pr1} = 0,6613 \cdot 1,009 = 0,667 \quad [-] \quad (197)$$

Souč. přestupu tepla konvekcí pro příčné proudění a vystřídaný svazek 1. st. Eka:

$$\alpha_{K1} = c_{S1} \cdot c_{z1} \cdot \frac{\lambda_1}{\left(\frac{d_1}{1000} \right)} \cdot \left[\frac{w_{S1} \cdot \left(\frac{d_1}{1000} \right)}{\nu_1} \right]^{0,6} \cdot Pr_1^{0,33} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (198)$$

$$\alpha_{K1} = 0,358 \cdot 1 \cdot \frac{0,044}{\left(\frac{33,7}{1000} \right)} \cdot \left[\frac{7,968 \cdot \left(\frac{33,7}{1000} \right)}{3,64 \cdot 10^{-5}} \right]^{0,6} \cdot 0,667^{0,33} = 84,93 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním v 1. stupni Eka:

nízké teploty spalin - sálání se neuvažuje $\alpha_{S1} = 0$ $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

Součinitel využití: $\xi = 0,98$ $[-]$

Součinitel přestupu tepla ze spalin do stěny v 1. stupni Eka:

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_{K1} + \alpha_{S1}) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (199)$$

$$\alpha_1 = 0,98 \cdot (84,93 + 0) = 83,231 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Součinitel zanešení v 1. stupni Eka:

$$\epsilon_1 = (c_{d1} \cdot c_{f1} \cdot \epsilon_{01}) + \Delta\epsilon \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad (200)$$

$$\epsilon_1 = (0,8 \cdot 1 \cdot 0,0028) + 0 = 0,00224 \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$$

Kde:

| | | |
|--------------------------|------------------------------|---|
| $c_{d2} = 0,8$ | $[-]$ | - opravný koeficient na vnější průměr trubky |
| $c_{f2} = 1$ | $[-]$ | - opravný koeficient na frakci popílkových částic |
| $\Delta\epsilon = 0$ | $[-]$ | - přídavek |
| $\epsilon_{02} = 0,0028$ | $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$ | - výchozí součinitel zanešení |

Součinitel prostupu tepla v 1. stupni Eka:

$$k_1 = \frac{\alpha_1}{1 + (\epsilon_1 \cdot \alpha_1)} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (201)$$

$$k_1 = \frac{83,231}{1 + (0,00224 \cdot 83,231)} = 70,152 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Tepelný výkon předaný prostupem stěnou trubek v 1. stupni Eka:

$$Q_{F1} = \Delta t_1 \cdot F_1 \cdot k_1 \cdot 10^{-3} \quad [kW] \quad (202)$$

$$Q_{F1} = 131,8 \cdot 32,016 \cdot 70,152 \cdot 10^{-3} = 296,018 \quad [kW]$$

Potřebný tepelný výkon pro 1. stupeň Eka - rozdíl:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_{F1} - Q_1 \quad [kW] \quad (203)$$

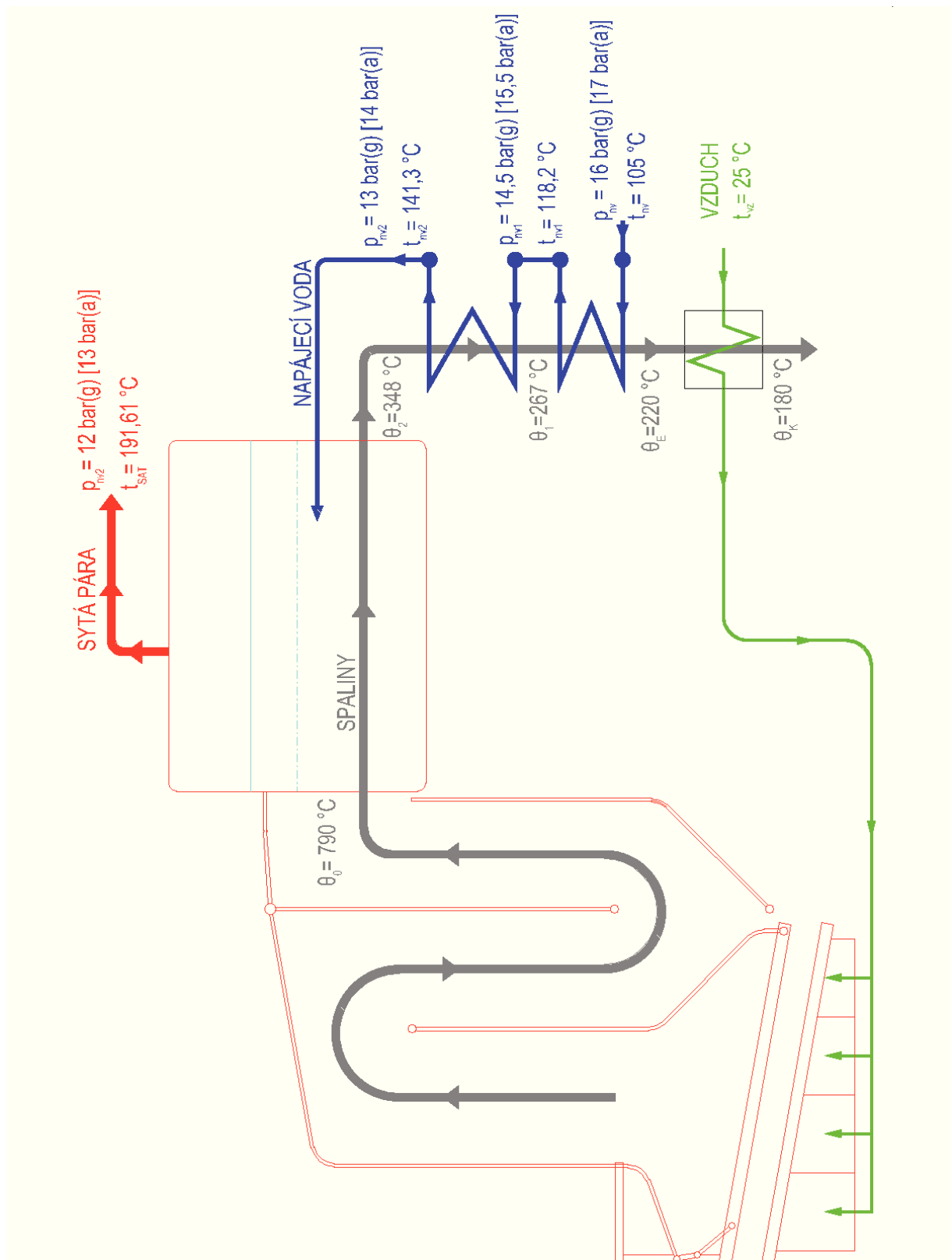
$$\Delta Q_1 = 296,018 - 294,86 = 1,158 \quad [kW]$$

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} \cdot 100 = \frac{1,158}{294,86} \cdot 100 = 0,39263 [\%] < -0,5 [\%] \quad (204)$$

Měrné zatížení výhřevné plochy v 1. stupni Eka:

$$q_1 = \frac{Q_{F1}}{F_1} \quad [kW \cdot m^{-2}] \quad (205)$$

$$q_1 = \frac{296,018}{32,016} = 9,246 \quad [kW \cdot m^{-2}]$$



Obr. 6.3 Rozvržení teplot a tlaků v kotli VSB-18000

7 Dimenzování válcového bubnu kotle

7.1 Zatížení parního prostoru

7.1.1 Zatížení parního prostoru na maximální hladinu

| | | |
|--|---------------------|-----------------------|
| Délka parního prostoru | $L = 5,15$ | $[m]$ |
| Poloměr parního prostoru | $R = 1,628$ | $[m]$ |
| Úhel parního prostoru | $\beta = 120$ | $[m]$ |
| Šířka na maximální hladině | $b = 2,777$ | $[m]$ |
| Součinitel | $y = 120$ | $[-]$ |
| Měrný objem syté páry | $v_{ } = 0,151175$ | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ |
| Měrný objem napájecí vody | $v_{nv} = 0,001047$ | $[m^3 \cdot kg^{-1}]$ |
| Průměr otvorů v napájecí jehle | $d_{OT} = 0,02$ | $[m]$ |
| Počet otvorů v napájecí jehle | $i_{OT} = 30$ | $[ks]$ |
| Vnitřní průměr trubky výstupního hrdla páry | $d_V = 0,3079$ | $[m]$ |
| Vnitřní průměr trubky v navazujícím potrubí páry | $d_{V2} = 0,2065$ | $[m]$ |
| Vnitřní průměr trubky napájecí jehly | $d_{nv} = 0,0825$ | $[m]$ |

Objem parního prostoru na maximální hladinu:

$$V = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \left[\left(\frac{\pi}{180} \cdot y \right) - \sin(\beta) \right] \cdot L \quad [m^3] \quad (206)$$

$$V = \frac{1}{2} \cdot 1,628^2 \cdot \left[\left(\frac{\pi}{180} \cdot 120 \right) - \sin(120) \right] \cdot 5,15 = 8,383 \quad [m^3]$$

Zatížení parního prostoru na maximální hladinu:

$$Z_V = \frac{M_p}{V} = \frac{5}{8,383} = 0,596 \quad [kg \cdot s \cdot m^{-3}] \quad (207)$$

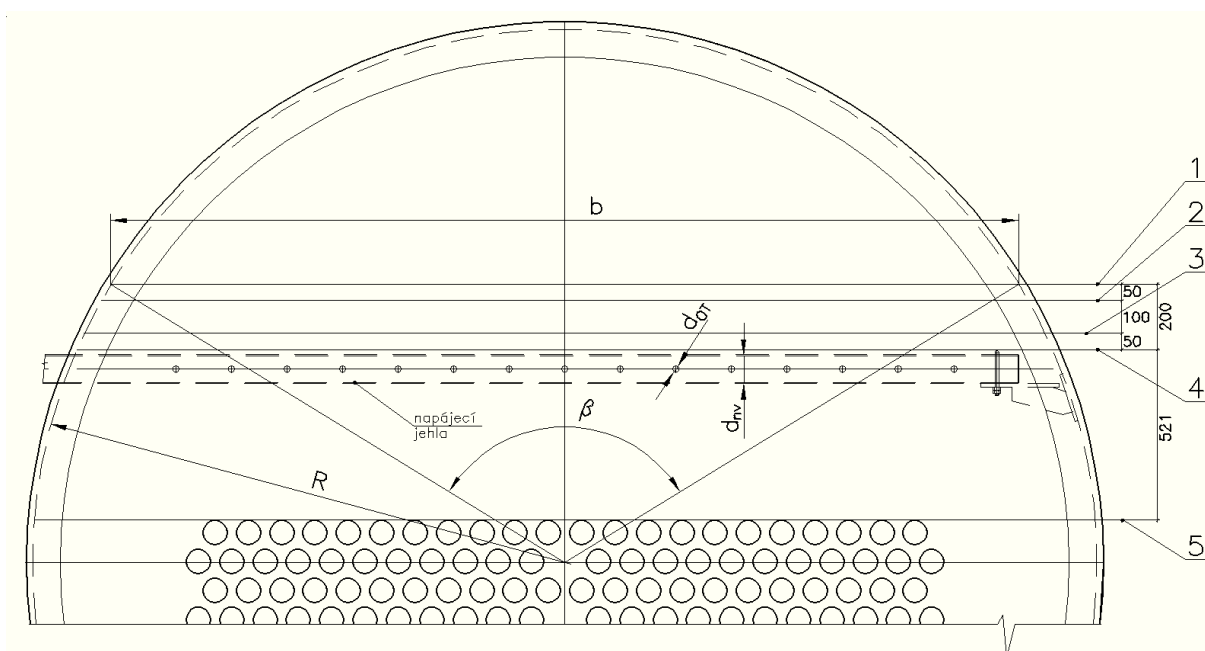
7.1.2 Zatížení plochy parního prostoru

Plocha na úrovni maximální hladiny:

$$F_{pl} = L \cdot b = 5,15 \cdot 2,777 = 14,302 \quad [m^2] \quad (208)$$

Zatížení plochy na maximální hladině:

$$Z_P = \frac{M_p}{F_{pl}} = \frac{5}{14,302} = 0,35 \quad [kg \cdot s \cdot m^{-2}] \quad (209)$$



Obr. 7.1 Dimenzování parního prostoru

Kde:

- 1 - maximální hladina - přeplnění kotle
- 2 - vypnutí napájecího čerpadla
- 3 - zapnutí napájecího čerpadla
- 4 - minimální hladina
- 5 - žárorys

7.2 Rychlosti média

7.2.1 Rychlost syté páry na výstupu z výparníku

Dimenze DN300 PN40, trubka $\phi 323,9 \times 8$ [mm]

Průtočný průřez na výstupu z výparníku:

$$S_V = \frac{\pi \cdot d_V^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,3079^2}{4} = 0,074 \quad [m^2] \quad (210)$$

Rychlost syté páry na výstupu z výparníku:

$$w_V = \frac{M_p \cdot v_{||}}{S_V} = \frac{5 \cdot 0,151175}{0,074} = 10,15 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (211)$$

7.2.2 Rychlost syté páry v navazujícím potrubí

Dimenze DN200 PN40, trubka $\phi 273 \times 8$ [mm]

Průtočný průřez v navazujícím potrubí výstupu z výparníku:

$$S_{V2} = \frac{\pi \cdot d_{V2}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,2065^2}{4} = 0,033 \quad [m^2] \quad (212)$$

Rychlost syté páry v navazujícím potrubí výstupu z výparníku:

$$w_{V2} = \frac{M_p \cdot v_{||}}{S_{V2}} = \frac{5 \cdot 0,151175}{0,033} = 22,57 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (213)$$

DN300 PN40 bezprostředně navazuje na parní prostor. V tomto místě je požadována nižší rychlost páry cca $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud by byla v tomto místě větší rychlost docházelo by k nežádoucímu přestřiku vody do páry a to by mělo za následek snížení její suchosti.

Dimenzování výstupního potrubí a hlavního parního ventilu je provedeno tak, aby se rychlost výstupní páry pohybovala v přijatelných mezích. Obvyklé rychlosti páry se pohybují v rozmezí 20 až $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Za ideální je považována rychlost $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

7.2.3 Rychlost vody v napájecím potrubí kotle

Dimenze DN80 PN40, trubka $\phi 88,9 \times 3,2 \text{ [mm]}$

Průtočný průřez napájecího potrubí:

$$S_{nv} = \frac{\pi \cdot d_{nv}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0825^2}{4} = 0,005346 \quad [m^2] \quad (214)$$

Rychlost vody v napájecím potrubí kotle:

$$w_{nv} = \frac{M_{nv} \cdot v_{nv}}{S_{nv}} = \frac{5,25 \cdot 0,001047}{0,05346} = 0,98 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (215)$$

Průtočný průřez otvorů v napájecí jehle:

$$S_{OT} = \frac{i_{OT} \cdot \pi \cdot d_{OT}^2}{4} = \frac{30 \cdot \pi \cdot 0,02^2}{4} = 0,009425 \quad [m^2] \quad (216)$$

Rychlost vody v otvorech napájecí jehly:

$$w_{OT} = \frac{M_{nv} \cdot v_{nv}}{S_{OT}} = \frac{5,25 \cdot 0,001047}{0,009425} = 0,56 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (217)$$

Rozsah rychlostí v napájecí jehle se pohybuje od $0,3$ do $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlosti u spodní hranice se nedoporučují, jelikož je rychlost při sníženém výkonu příliš malá. Ideální rychlost je $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, která je dlouhodobě odpozorována na kotlích podobné konstrukce.

8 Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo navržení parního kotle o zadáných parametrech $18000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, $12 \text{ bar}(a)$ a tomu odpovídající teplotě $191,61 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Palivem byla zadaná směs obilných otrub a výpalků z výroby bioetanolu spolu s kaly z flotace a aerobní pěny.

Díky relativně nízké teplotě měknutí popela, a případnému vzniku nánosů na stěnách komory, je nutné udržovat teplotu ve spalovací komoře do $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]. Tento požadavek zásadně ovlivňuje konstrukci a rozmístění nejen výhřevných ploch, ale také přidružených zařízení, jako jsou např. spalinový a vzduchový ventilátor a jejich rozvody.

Pomocí příslušných výpočtů byly navrženy určité části kotle, jednotlivé výhřevné plochy a konkrétní rozměry těchto částí. Pro výpočet žárotrubného výparníku je použita zadaná teplota spalin na vstupu $790 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Není tak řešen prostor spalovací komory a teploty v ní.

Z výpočtu vyšla teplota spalin na výstupu z výparníku $348 \text{ }^{\circ}\text{C}$, která je dále použita pro výpočet druhého a následně prvního stupně ekonomizéru. Ačkoliv je součástí celkové sestavy ohřívák vzduchu, není s tímto ve výpočtu počítáno a bere se teplota vzduchu $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Na konci spalinového tahu je dosaženo teploty $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Účinnost kotle je $85,9 \%$ viz. kapitola 5.1.4.

Teplota napájecí vody je díky ohříváku vody (ekonomizéru) ze $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$, vstupujících do prvního stupně ekonomizéru z napájecí nádrže, zvýšena na $141,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Této teploty je dosaženo v místě opuštění druhého stupně ekonomizéru (na vstupu do žárotrubného bubnu).

V poslední části práce je popsána problematika dimenzování žárotrubné části, především zatížení parního prostoru, rychlosti média na vstupu a výstupu z výparníku. Dále určení minimální a maximální hladiny a také regulačního rozsahu ve výparníku.

Formou příloh je řešen výkres žárotrubného výparníku, kusovník žárotrubného výparníku, výkresy prvního a druhého stupně ekonomizéru a I-t diagram vzduchu a spalin.

9 Literatura

- [1] ČERNÝ, V.; JANEBA, B.; TEYSSLER, J. *Parní kotle - Technický průvodce 32*. 1. vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. 864 s. t.č. L12-E1-IV-41/226101
- [2] IBLER, Z. a kol. *Technický průvodce energetika*. 1. vydání. Praha: BEN, 2002. 616 s. ISBN 80-7300-026-1.
- [3] IBLER, Z. a kol. *Energetika v příkladech*. 1. vydání. Praha: BEN, 2003. 384 s. ISBN 80-7300-079-0.
- [4] MAREŠ, R.; ŠIFNER, O.; KADRNOŽKA, J. *Tabulky vlastností vody a páry*. 1. vydání. Brno: nakladatelství VUTIUM, 1999. 158 s. ISBN 80-214-1316-6.
- [5] HONSIG, F. *Rošty parních kotlů a spalování méně hodnotných paliv*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. 272 s. t.č. L12-B3-3II/2224.
- [6] BUDAJ, F. *Parní kotle - Podklady pro tepelný výpočet*. 3. vydání. Brno: skripta VUT v Brně, 1985. 288 s.
- [7] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 212 s. ISBN 80-01-02591-8.
- [8] NOSKIEVIČ, P. *Spalování uhlí*. 1. vydání. Ostrava: skripta VŠB TU Ostrava, 2002. 62 s.
- [9] VILIMEC, L. *Stavba kotlů I*. Ostrava: skripta VŠB TU Ostrava, 2002. 116 s.
- [10] VILIMEC, L. *Stavba kotlů II*. Ostrava: skripta VŠB TU Ostrava, 2006. 151 s. ISBN 80-7078-681-7.
- [11] ČSN 070414. *Kotle parní a horkovodní*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1989. 68 s.
- [12] ON 070417 - Návrh. *Tepelný výpočet parných kotlov*. Návrh oborové normy. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1984. 270 s..
- [13] ČSN 070620. *Konstrukce a výstroj parních a horkovodních kotlů*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1978. 64 s.
- [14] ČSN 070622. *Výroba parních a horkovodních kotlů*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1988. 48 s.
- [15] ČSN 070305. *Hodnocení kotlových ztrát*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1984. 31 s.
- [16] ČSN 134309. *Průmyslové armatury POJISTNÉ VENTILY*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 56 s.
- [17] ČSN EN 12953-3. *Válcové kotle - Část 3: Konstrukce a výpočet částí namáhaných tlakem*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 84 s.
- [18] KOHOUT, P. *Spalování odpadů z výroby bioethanolu*. All For Power. 02/2009, 3. ročník, příloha Kotle a energetická zařízení, strany XI - XII. ISSN 1802-8535

- [19] MALAŤÁK, J.; VACULÍK, P. *Biomasa pro výrobu energie*. 1.vydání. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2008. 206 s. ISBN 978-80-213-1810-6
- [20] TH, s.r.o. *Firemní materiály*.
- [21] DOTEK Energo International s.r.o. *Firemní materiály*.
- [22] IPPC. *Velká spalovací zařízení* [online]. [cit. 31.3.2010].
Dostupné z: <<http://www.ippc.cz/dokumenty/DC0068>>
- [23] ŠEVELOVÁ, K.; STÁREK, K.; BERKA, I.; HEROSCH, J.; SALVET, P. *Parní kotle (návody do cvičení)* [online]. 2007, Inovace studijních programů. [cit. 12.2.2011].
Dostupné z: <<http://www.fs.vsb.cz/euprojekty/414/parni-kotle.pdf>>
- [24] HROMÁDKO, J.; HROMÁDKO, J.; MILER, P.; HÖNIG, V.; ŠTĚRBA, P. *Výroba bioetanolu* [online]. 2010, Listy cukrovarnické a řepařské 126, červenec - srpen 2010. [cit. 8.3.2011].
Dostupné z: <<http://www.cukr-listy.cz/online/2010/PDF/267-271.PDF>>
- [25] ZEMAN, L.; TVRZNÍK, P. *Využití vedlejších produktů vznikajících při výrobě bioetanolu* [online]. 2007, Výzkumný ústav živočišné výroby, v.v.i. [cit. 15.12.2010].
Dostupné z: <[http://www.vuzv.cz/sites/Zeman%20vypalky\(2\).pdf](http://www.vuzv.cz/sites/Zeman%20vypalky(2).pdf)>
- [26] ČESKÉ SDRUŽENÍ PRO BIOMASU [online].
Dostupné z: <<http://www.biom.cz>>
- [27] PRŮMYSLOVÝ LIHOVAR V TRMICÍCH [online].
Dostupné z: <<http://www.plp.cz>>
- [28] PROKOP INVEST, a.s [online].
Dostupné z: <<http://www.prokop.cz>>

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 4.1: Závislost absolutního tlaku na teplotě vzduchu | 27 |
| Tab. 4.2: Hustota plynných složek spalin a vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$] | 31 |
| Tab. 4.3: Závislost měrné tepelné kapacity suchého vzduchu c_{ps} a vodní páry c_{H_2O} na teplotě | 31 |
| Tab. 4.4: Závislost měrné tepelné kapacity vlhkého vzduchu na teplotě | 32 |
| Tab. 4.5: Entalpie minimálního množství vzduchu | 32 |
| Tab. 4.6: Měrná entalpie složek spalin v závislosti na teplotě | 33 |
| Tab. 4.7: Entalpie minimálního množství spalin | 33 |
| Tab. 4.8: Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva | 34 |
| Tab. 5.1: Součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě spalin [7] | 36 |
| Tab. 5.2: Kinematická viskozita při střední teplotě spalin [7] | 36 |
| Tab. 5.3: Prandtlovo číslo při střední teplotě spalin [7] | 37 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 2.1: Výroba bioetanolu z biomasy obsahující škrob [24] | 14 |
| Obr. 2.2: Výroba bioetanolu z lignocelulózové biomasy [24] | 15 |
| Obr. 2.3: Komplexní zpracování výpalků - technologické schéma [28] | 16 |
| Obr. 3.1: Otruby ve spalovací komoře | 17 |
| Obr. 3.2: Dvourotorová sušárna [28] | 18 |
| Obr. 3.3: Rozvržení kotle VSB-18000 [21] | 18 |
| Obr. 3.4: Přivaření žárových trubek k čelu tělesa kotle | 19 |
| Obr. 3.5: Příklad vystřídáního svazku a trubkového hada | 20 |
| Obr. 6.1: Rozteče trubek pro 2. stupeň eka - vystřídání svazek | 47 |
| Obr. 6.2: Rozteče trubek pro 1. stupeň eka - vystřídání svazek | 54 |
| Obr. 6.3: Rozvržení teplot a tlaků v kotli VSB-18000 | 57 |
| Obr. 7.1: Dimenzování parního prostoru | 59 |

Přílohy

- Příloha A: - I-t diagram vzduchu a spalin
- Příloha B: v.č. 1982-01/00 - těleso kotle VSB-18000
- Příloha C: k.č. 1982-01/00-k - kusovník tělesa kotle VSB-18000
- Příloha D: v.č. 1982-02/00 - 2. stupeň ekonomizéru
- Příloha E: v.č. 1982-03/00 - 1. stupeň ekonomizéru